

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені Ігоря Сікорського

РОЗРАХУНОК І КОНСТРУЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ПРИЛАДІВ

Частина 1. «Принципи конструювання і точність оптичних приладів»

Підручник

для студентів

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
системи та технології»

спеціалізації «Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи
і технології»

та спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна
техніка»

спеціалізації «Фотоніка та оптоінформатика»

*Гриф надано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(Протокол № 6 від 04 червня 2018)*

КИЇВ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2018

Розрахунок і конструювання оптичних приладів. Частина 1. «Принципи конструювання і точність оптичних приладів» : Підручник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані системи та технології» спеціалізації « Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи і технології» та спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірjuвальна техніка» спеціалізації «Фотоніка та оптоінформатика» [Текст] / Уклад. : О. К. Кучеренко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.
– 157стор.

Розглянуто основи конструювання деталей та з'єднань, принципи розрахунку і конструювання оптичних приладів (ОП) виходячи з умов точності і надійності, особливості конструювання основних функціональних вузлів ОП.

Розрахунок і конструювання оптичних приладів.

Ч. 1. «Принципи конструювання і точність оптичних приладів»

Підручник для студентів

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані системи та технології» спеціалізації « Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи і технології»

та спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірjuвальна техніка»

спеціалізації «Фотоніка та оптоінформатика»

Укладач : *Кучеренко Олег Костянтинович*

Відповідальний редактор : *Колобродов Валентин Георгійович*

Рецензенти: *Овчар Микола Іванович (КП СПБ «Арсенал»)*

Русняк Ігор Миколайович (НВО«Квант»)

ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	8
Розділ 1. Конструкторська підготовка при виробництві	
оптичних приладів.....	10
1.1. Основні поняття. Елементарні логічні методи конструювання.....	10
1.2. Нормативно-технічна документація та основні вимоги до конструювання оптичних приладів.....	13
1.3. Зміст основних стадій та етапів розроблення приладу.....	17
Контрольні питання.....	21
Розділ 2. Принципи розроблення конструкції приладу виходячи з	
вимог точності і надійності.....	22
2.1. Поняття точності приладу. Класифікація похибок.....	22
2.2. Основне рівняння точності приладу.....	27
2.3. Методика виявлення похибок, що потребують компенсації. Розрахунки характеристик компенсаторів похибок.....	29
2.4. Методи підвищення точності при проектуванні оптичних приладів.....	33
2.5. Теоретико-вірогідносний підхід при оцінюванні точності приладу.....	34
2.6. Поняття надійності приладів. Характеристики надійності.....	41
2.7. Засоби підвищення надійності приладів.....	44
Контрольні питання.....	45

Розділ 3. Основи конструювання деталей і з'єднань.....	46
3.1. Структурні елементи деталей. Вибір матеріалу, форми, визначення розмірів.....	46
3.2. Типи з'єднань деталей та вибір методу з'єднань. Класифікація та характеристики контактних пар.....	49
3.3. Основи базування деталей. Геометрична невизначенність та перетворення класів контактних пар. Надлишкове базування.....	53
3.4. Методика визначення та способи усунення надлишкових зв'язків. З'єднання оптичних деталей з механічними.....	59
Контрольні питання.....	65
Розділ 4. Конструювання вузлів освітлювачів.....	67
4.1. Конструювання вузла освітлювача в мікроскопах.....	67
4.2. Конструювання вузла освітлювача в проекційних приладах.....	70
4.3. Конструювання вузла освітлювача в коліматорних приладах.....	71
4.4. Основні формули для розрахунку освітлювачів. Особливості конструкцій освітлювачів. Приклади конструкцій	72
Контрольні питання	80
Розділ 5. Конструювання вузлів об'єктивів і окулярів.....	81
5.1. Основні характеристики і класифікація конструкцій об'єктивів. Вимоги до точності позиціювання об'єктивів.....	81
5.2. Похибки конструкції об'єктивів.....	83
5.3. Розрахунки термокомпенсаторів при конструюванні об'єктивів.	88
5.4. Класифікація та основні типи систем автофокусування об'єктивів.....	92

5.5. Поняття центрування об'єктів. Методи компенсації децентрувань.....	98
5.6. Класифікація окулярів.....	100
5.7. Конструювання об'єктів і окулярів.....	102
Контрольні питання.....	108

Розділ 6. Конструювання вузлів з дзеркально-призматичними

системами.....	109
6.1. Класифікація дзеркально-призматичних систем. Матриця дії та принципи конструювання вузла плоского дзеркала.....	109
6.2. Матриця дії вузла кутового дзеркала та приклади її застосування.....	115
6.3. Особливі напрями в конструкції вузла кутового дзеркала.....	120
6.4. Діючі пересування та оптимізація конструкції вузла кутового дзеркала.....	124
6.5. Зведення складних дзеркально-призматичних систем до простих еквівалентів.....	128
6.6. Сканувальна система з плоским дзеркалом. Похибки базування дзеркала та їх компенсація.....	129
6.7. Сканувальні вузли з призмами і багатогранними дзеркалами.....	133
Контрольні питання.....	137

Розділ 7. Конструювання оптичних функціональних вузлів

точного відліку.....	138
7.1. Характеристики оптико-механічних вузлів точного відліку.....	138
7.2. Оптико- механічні мікрометри.....	141

7.3. Фотоелектричні відлікові пристрої. Кодові та растрові	
відлікові пристрої.....	149
Контрольні питання	156
Список літератури.....	156

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БЕ – базовий елемент
ВЕ – вільний елемент
ГВ – геометрична вісь
ГСТУ – галузевий стандарт України
ДПС – дзеркально-призматична система
ДСТУ – Державний стандарт України
ЄСКД – Єдина система конструкторської документації
ЗТУ – загальні технічні умови
ІЧ – інфрачервоний
КД – кутове дзеркало
КДВ – конструкторсько-доводочні випробування
ККД – коефіцієнт корисної дії
ЛЗВ – лабораторно-заводські випробування
ОВ – оптична вісь
ОП – оптичний прилад
ПВВ – повне внутрішнє відбиття
ПЗ – пояснювальна записка
ППП – плоскопаралельна пластинка
РЕ – робочий елемент
САФ – система автоматичного фокусування
СТП – стандарт підприємства
ТВ – технічні вимоги
ТЗ – технічне завдання
ТР – технічний ресурс
ТС – термін служби
ТУ – технічні умови
ЧТУ – часні технічні вимоги

ВСТУП

Підручник присвячено основам конструювання точних оптичних приладів, що містять механічні, оптичні й електронні функціональні пристрої та елементи. Особливості конструювання таких приладів полягають в тому, що їх показники якості, а саме точність, надійність і технологічність залежать від дотримання певних правил і принципів конструювання, способів функціонального і точнісного синтезу конструкцій, знання шляхів підвищення якості приладів під час проектування.

Нині бракує літератури з прикладного конструювання оптичних приладів. Найбільше відомі: «Довідник конструктора оптико-механічних приладів» [1], «Довідник оптико-технолога» [2], підручники і навчальні півісбники з конструювання оптичних приладів [3; 4; 5; 6; 8]. Ці видання носять рецептурний характер і не є узагальнюючими, не завжди в повному обсязі містять питання пов'язані з конструюванням точних оптичних приладів.

Слід зазначити, що розглянути всі теоретичні і практичні питання конструювання оптичних приладів в одному підручнику неможливо. Автор вважає, що студенти й інші читачі ознайомлені з такими необхідними основами й розділами конструювання, як «Допуски і посадки», «Опір матеріалів», «Деталі приладів», «Технічна механіка», «Матеріалознавство», «Теоретична механіка», «Технологія приладобудування і оптичного приладобудування», «Теорія оптичних систем». Тому основний акцент у цьому підручнику поставлено на питаннях конструювання пов'язаних з показниками точності приладів і їхніх елементів.

Підручник написано на базі дисципліни, яку протягом багатьох років викладають на кафедрі «Оптичних та оптико-електронних приладів». Викладено питання, які стосуються першої частини дисципліни «Розрахунок і конструювання оптичних приладів». Мета дисципліни здобуття студентами знань, потрібних для розуміння принципів розрахунку та конструювання типових оптичних приладів, дії оптичних приладів та їх елементів, а також вмінь та навичок, які потрібні для оволодіння та засвоєння знань, на яких базується розроблення, розрахунок та конструювання таких приладів.

Розглянуто загальні питання процесу конструювання, основні положення теорії точності та надійності приладів, основи конструювання деталей та з'єднань, особливостей розрахунку та конструювання типових вузлів оптичних приладів.

Існує велика кількість видів оптичних приладів. Їх номенклатура сягає декілька тисяч найменувань. Декілька десятків тисяч найменувань – номенклатура функціональних пристроїв і елементів, що застосовують у промисловості у точному приладобудуванні.

Однак підготовка спеціалістів з проектно-конструкторської діяльності не повинна носити рецептурний характер і ґрунтуватися на вивченні певного конструкторського виробу. Потрібно вивчати загальні правила та принципи проектування і конструювання під час створення всіх видів технічних виробів.

Методи проектування і конструювання описують можливі шляхи та засоби пошуку ідей інженерних рішень проектно-конструкторських завдань. Принципами конструювання є правила і конструктивні рішення, які дозволяють отримати потрібні цільові функції виробу (основні показники якості виробу: точність, надійність, технологічність).

РОЗДІЛ 1

КОНСТРУКТОРСЬКА ПІДГОТОВКА ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ОПТИЧНИХ ПРИЛАДІВ

1.1. Основні поняття. Елементарні логічні методи конструювання

Створення нового зразка приладу має такі стадії:

- розроблення фундаментальної ідеї приладу і первинних технічних умов для його реалізації;
- вибір технічного принципу реалізації ідеї і розроблення принципової схеми приладу;
- розроблення конструкції приладу;
- виготовлення і випробування дослідного зразка приладу.

Другу і третю стадію об'єднують терміном проектування приладів. Тобто конструювання – це друга частина процесу проектування і йде за розробленням принципової схеми приладу. Конструювання розпадається на ряд етапів регламентованих Державними стандартами України (ДСТУ). Розрізняють такі етапи:

- технічне завдання;
- технічна пропозиція;
- ескізний проект;
- технічний проект;
- робоче конструювання;
- виготовлення і випробування дослідного зразку;
- коректування конструкторської документації.

Відповідно до ДСТУ встановлюють такі види виробів:

- деталь (виріб, виготовлений з одного матеріалу);
- складальна одиниця (виріб, складові частини якого підлягають з'єднанню на підприємстві виготівнику);

- комплекс (два і більш специфікованих вироби не з'єднані на підприємстві виготовнику складальними операціями, але передбачувані для взаємозв'язаних експлуатаційних функцій);
- комплект (набір виробів, що має загальне експлуатаційне призначення допоміжного характеру).

Існують елементарні логічні методи конструювання. До таких методів відносяться абстрагування і класифікація. Абстрагування полягає в здобутті абстрактних понять та ідеальних уявлень про предмет конструювання. Застосовується цей метод для спрощення взаємозв'язків за конструювання. Класифікація призначена для однозначного знаходження місця приладу в системі впорядковування приладів різних типів. При вирішенні конструкторських завдань, як правило, використовується наступна послідовність дій.

1. Аналіз процесу конструкторської підготовки виробництва. При цьому корисними можуть бути питання представлені на рис. 1.1.
2. Аналіз технічної проблеми. На цьому етапі конструктор аналізує можливості приладу в очікуваних умовах його експлуатації.
3. Аналіз технологічного процесу.
4. Формулювання часних завдань. Розбиття завдань на часні проводиться з таких точок зору:
 - технічна точка зору (врахування структури, технології виробництва);
 - методологічна точка зору (врахування етапів виробництва);
 - організаційна точка зору (врахування кооперації);
 - виходячи з часу на розробку.
5. Визначення порядку дій під час рішення задачі.
6. Виконання ескізного проекту.

Відомо декілька методів синтезу функціональної структури приладу.

1. Метод «Чорного ящика» заснований на побудові структури приладу, наданого у вигляді «чорного ящика» починаючи з вхідних і вихідних величин. При цьому аналізується відмінність між вхідними і вихідними величинами. Структура приладу будується із залученням відомих

функціональних елементів з врахуванням відомих границь системи, що б виявлена відмінність була здолана. Використовується метод заміни складних окремих функцій простими, поки не будуть визначені основні конструктивні елементи приладу.

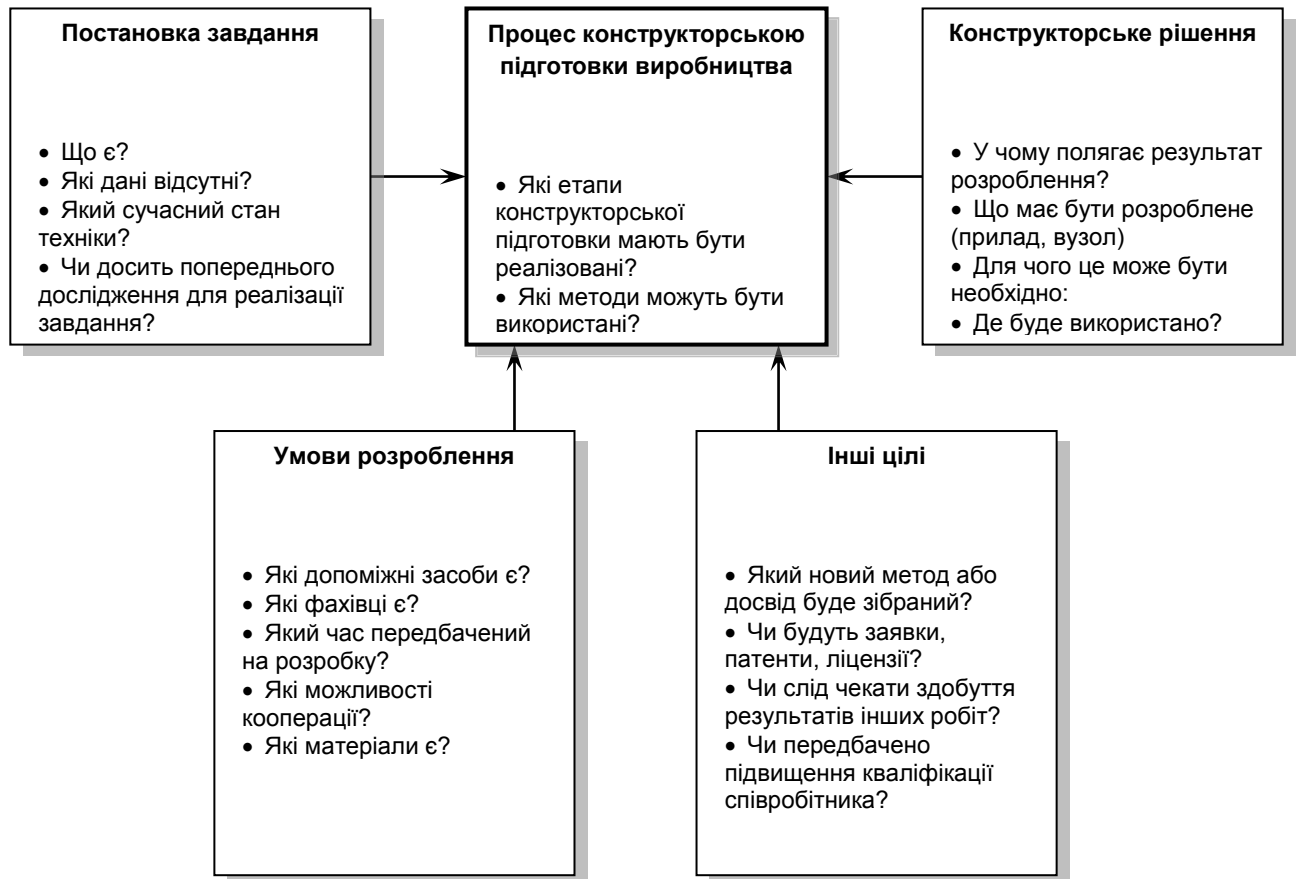


Рис.1. 1. Аналіз процесу конструкторської підготовки виробництва

2. Метод засновано на комбінаційних таблицях і полягає у виборі відомих варіантів елементів приладу і об'єднанні цих елементів для створення нової структури приладу. Для комбінацій доцільно мати комбінаторні таблиці, які містять наочний перелік можливих варіантів конструкторських рішень.

Для ухвалення остаточних рішень під час конструювання, якщо конструкторське завдання є надзвичайно складним і багатofакторним, використовуються такі методи.

3. «Мозковий штурм». Полягає в зборі фахівців з даного напрямку, спільному обговоренні даної проблеми і ухваленні раціонального рішення.

4. «Метод 635». Цей метод є модифікованою формою «мозкового штурму», при якому пропозиції вирішення проблеми подаються у друкованому вигляді. Кожен з шести учасників подає по колу три пропозиції, а такі п'ять їх доопрацьовують, доповнюють і змінюють для здобуття оптимального варіанту.

5. Метод Дельфійський використовує принцип опитування експертів, які відповідають незалежно один від одного.

6. Синектіка. Це метод заміни і об'єднання різних і незначних на перший погляд понять, що знаходяться за межами даної області, але дають у результаті найбільш раціональний варіант вирішення проблеми. Такі аналоги можуть бути узяті з природи.

1.2. Нормативно-технічна документація та основні вимоги до конструювання оптичних приладів

Стандартизація – це планова діяльність по встановленню обов'язкових правил, норм і вимог, виконання яких забезпечує оптимальну якість продукції, підвищення продуктивності праці і ефективне використання матеріальних засобів.

В Україні розроблена державна система стандартизації, що складається з комплексу взаємозв'язаних стандартів ДСТУ, яка упорядковує проведення робіт по стандартизації в масштабах всієї країни. Цими роботами керує Укртестметрстандарт. Стандартизацією в міжнародному плані, займається міжнародна організація по стандартизації ISO. Робота по стандартизації направлена на вирішення наступних завдань.

1. Встановлення науково-обґрунтованих вимог до характеристики продукції.
2. Розроблення єдиної системи характеристики продукції, методів і засобів її випробування і контролю.

3. Встановлення єдиної системи норм, вимог і методів в області проектування, з метою скорочення різноманіть видів, марок і типорозмірів продукції.

В Україні чинні такі стандарти:

- державні стандарти України (ДСТУ);
- галузеві стандарти України (ГСТУ);
- стандарти підприємства (СТП).

Залежно від об'єктів і змісту стандарти розділяють на такі види:

- стандарти технічних умов;
- параметрів або розмірів;
- типів, марок і сортаменту;
- конструкції і розмірів;
- правил приймання і методів випробувань;
- типових технологічних процесів.

Усі стандарти, пов'язані з проектуванням приладів, об'єднані в єдину систему конструкторської документації (ЄСКД), яка містить понад 100 стандартів. Ці стандарти розділені на класифікаційні групи.

1. Загальні положення.
2. Основні положення (види виробів, види конструкторської документації, стадії розроблення, основні вимоги до креслень і документів).
3. Класифікація і позначення виробів в конструкторських документах.
4. Загальні правила виконання креслень.
5. Правила виконання креслень виробів в машинобудуванні і приладобудуванні.
6. Правила оформлення конструкторських документів.
7. Правила виконання ремонтної і експлуатаційної документації.
8. Правила виконання схем і позначення умовні графічні.
9. Правила виконання документів будівельних і суднобудівельних.
10. Інші стандарти.

Комплект конструкторської документації на прилад повинен містити основні документи.

1. Креслення деталі.
2. Складальні креслення.
3. Креслення загального вигляду.
4. Габаритні і монтажні креслення.
5. Схеми.
6. Специфікації.
7. Відомості:
 - специфікацій;
 - купівельних виробів;
 - технічної пропозиції;
 - ескізного і технічного проекту.
8. Пояснювальну записку.
9. Технічні умови.
10. Експлуатаційну документацію (паспорт або формуляр, технічний опис, інструкцію з експлуатації).

Основною вимогою, що пред'являється при проектуванні ОП, є виконання заданих в технічному завданні технічних характеристик з необхідною надійністю в заданих умовах експлуатації. Основні показники і характеристики приладу такі.

1. Показники призначення – характеризують призначення, сферу застосування, точність, світлосилу, роздільну здатність і тому подібне.
2. Показники надійності функціонування приладу, яка характеризується такими основними показниками:
 - вірогідністю безвідмовної роботи;
 - інтенсивністю відмов;
 - середнім часом напрацювання на відмову;
 - довговічністю;
 - ремонтпридатністю.

3. Показники технологічності: коефіцієнт блоковості, трудомісткість і тому подібне.
4. Показники ергономічності: зручність експлуатації, гігієнічність, антропометричні параметри і тому подібне.
5. Показники економічності: простота обслуговування і ремонту, мінімальне енергоспоживання.
6. Показники стандартизації і уніфікації.
7. Показники безпеки.

За конструювання приладів необхідно враховувати тип виробництва: одиничне, серійне або масове. У одиничному виробництві більше використовують механообробку (різання, фрезерування), збірку приладів з профільного прокату. У серійному і масовому виробництві доцільно застосовувати точне лиття, штампування, використовувати деталі з пластмас, порошкових матеріалів.

Необхідно враховувати також умови роботи приладу. У спеціальних умовах перепад температур в довкіллі може бути $\pm 60^{\circ}\text{C}$. Прискорення, що накладається на прилад, може сягати до $100g$. На прилад може впливати проникаюча радіація, невагомість і інші шкідливі фактори.

Технічні вимоги (ТВ) на виготовлення приладу задаються в технічних умовах (ТУ), які входять в комплект документації приладу. На підприємствах оптичної промисловості діють загальні технічні умови (ЗТУ) у вигляді галузевих стандартів України (ГСТУ). ЗТУ містять такі вимоги:

- організаційно-технічні визначають перелік технічної документації, гарантійні терміни роботи і зберігання приладу;
- вимоги до матеріалів, зокрема і до скла, налетостійкості скла, вживаних змашувальних і ущільнюючих матеріалів;
- вимоги до виготовлення деталей та вузлів;
- вимоги до характеристик обробки та покриттів приладу;
- вимоги до електричної частини приладу;
- вимоги до комплектації;
- вимоги до ящиків укладання і пакування приладу.

У ЗТУ вказують основні методи випробувань і правила приймання приладу. На підставі ЗТУ розробляються часні технічні умови (ЧТУ), в яких окрім загальних вимог вказують вимоги, що відносяться до окремих типів приладів.

Багато ОП працюють в умовах тропічного клімату, який ділять на види:

- тропічний сухий (степи, пустелі);
- тропічний вологий (джунглі, савани);
- тропічний морський.

Умови роботи приладу обов'язково вказуються в ТУ. Поєднання високої вологості і температури приводить до інтенсивного розмноження пліснявілих грибків. При використанні в умовах тропічного клімату відбувається розм'якшення твердих з'єднальних і ізоляційних матеріалів, витікання мастила, деформація деталей з пластмас і гум. У зв'язку з цим, є спеціальні нормалі, які визначають вимоги до виготовлення приладів, що працюють в цих умовах.

1. 3. Зміст основних стадій та етапів розроблення приладу

Технічне завдання

При розробленні технічного завдання вирішують наведений нижче перелік питань.

1. Мета розроблення, призначення і сфера застосування приладу.
2. Джерела фінансування.
3. Технічні вимоги до приладу.
4. Вимоги безпеки.
5. Вимоги до технологічності.
6. Вимоги до контролю і випробування.
7. Стадії розроблення приладу.
8. Техніко-економічні вимоги.
9. Спеціальні вимоги.
10. Застосування приладу.

Технічна пропозиція

При розробленні технічної пропозиції вирішують такі питання.

1. Підбирають і вивчають публікації з теми розроблення.
2. Встановлюють головні відмінні ознаки приладу, поліпшуючі конструкцію.
3. Визначають принципову можливість виконання ТЗ, проводять розрахунки і експерименти.
4. Складають перелік необхідних науково-дослідних робіт.
5. Проводять технічне і техніко-економічне обґрунтування для розроблення приладу.
6. Уточнюють ТЗ.
7. Розробляють пояснювальну записку(ПЗ) до цього етапу.

Ескізний проект

Ескізний проект починається з розроблення основних схем приладу. Види і типи схем встановлені ДСТУ. Розрізняють такі види схем і їх позначення.

1. Електричні схеми [Е].
2. Гідравлічні схеми [Г].
3. Пневматичні схеми [П].
4. Кінематичні схеми [К].
5. Оптичні схеми [Л].

Типи схем і їх позначення такі.

1. Структурна схема [1].
2. Функціональна схема [2].
3. Принципова схем [3].
4. Схеми з'єднань [4].
5. Схеми підключень [5].
6. Загальна схема [6].

ДСТУ передбачає певні вимоги при розробленні схем приладу. Так, наприклад, на функціональній електричній схемі електронні блоки (мікропроцесор, підсилювач і подібні блоки) зображають у вигляді прямокутників. Оптичні елементи зображаються з спрощеннями, а саме складні об'єктиви зображають однією лінзою, дзеркально-призматичні

вузли одним плоским дзеркалом і тому подібне. На схемі обов'язково вказують хід променів, замість позицій на виносних полицях вказують найменування елементів. На полі креслення вказують типи приймачів, джерел і інших не оптичних елементів. Функціональна схема не виконується в масштабі, електричні зв'язки між блоками зображають суцільною лінією, а механічні пунктирною.

Оптична схема виконується обов'язково в масштабі. На полі креслення робиться специфікація. Позиції специфікації заповнюються по ходу променя. На кресленні необхідна таблиця, в якій вказують фокусні відстані і фокальні відрізки силових оптичних елементів за формою, що наведена в табл.1.1.

Таблиця 1.1

Форма таблиці на оптичній схемі

Назва	Позиція	f'	S_F	$S'_{F'}$

Усі оптичні елементи на оптичній схемі викреслюються в масштабі, з вказівкою відстаней між елементами схеми уздовж вісі, а так само вказуються положення площин вхідної зіниці, вихідної зіниці, модулятора. Позиції від джерел і приймачів не виносяться, а на полі креслення вказуються типи цих елементів. На полі креслення в примітках вказують основні технічні і оптичні характеристики приладу.

При розробленні ескізного проекту проводять загальну компоновку приладу і взаємну ув'язку всіх вузлів, блоків і елементів приладу. Це креслення виконують із спрощеннями, змальовують лише основні складальні одиниці. Запозичені і покупні вироби змальовують лише контуром. При розробленні ескізного проекту конструктор враховує необхідність попереднього узгодження стикувальних баз приладу з суміжними організаціями. До стикувальних баз відносять наступні:

- габаритні;
- посадочні;

- приєднувальні;
- кріплення приладу;
- вхідні і вихідні зв'язки.

У результаті виконання ескізного проекту здаються такі документи.

1. Необхідні схеми.
2. Креслення загального вигляду з спрощеннями.
3. Пояснювальна записка з розрахунками.

За підсумками захисту ескізного проекту приймається рішення про необхідність подальших етапів розроблення приладу.

Технічний проект

Цей проект відрізняється від ескізного детальною і остаточною розробкою конструкції приладу. Креслення загального вигляду і вузлів, що розробляються, мають бути конструктивно закінчені настільки, щоб можна було надалі виконати робочі креслення кожної деталі. Після виконання технічного проекту складаються такі документи.

1. Пояснювальна записка.
2. Креслення загального вигляду і основних вузлів.
3. Відомість технічного проекту.

Технічний проект приймається Замовником.

Розроблення конструкторської документації

На цьому етапі остаточно розробляється конструкторська документація для подальшого виготовлення дослідного зразка приладу.

1. Розробляються всі види схем.
2. Складальні креслення, деталі.
3. Інструкції по юстуванню і експлуатації.
4. Технічні умови, формуляр і паспорт на прилад.

Виготовлення дослідного зразка

Дослідний зразок виготовляють в дослідному цеху відповідно до робочих креслень на прилад. Зауваження що виникли при виготовленні реєструють з метою подальшого внесення змін до креслень.

Випробування дослідного зразка

Ці випробування підрозділяються на попередні і державні. Попередні випробування проводять з метою перевірки дослідного зразка вимогам ТУ. Ці випробування підрозділяють на:

- конструкторсько-доводочні випробування (КДВ);
- лабораторно-заводські випробування (ЛЗВ).

КДВ проводять за програмою затвердженою розробником з метою виявлення можливостей приладу і відповідності приладу ТУ. При цьому можливе доопрацювання КД. ЛЗВ проводять за програмою погодженою із Замовником. Результат випробування оформляють відповідним актом.

Державні випробування проводять з метою повної перевірки відповідності дослідного зразка ТУ і можливості запуску приладу в серійне або масове виробництво. Ці випробування проводить державна комісія. Результати державних випробувань оформлюються у вигляді акту. Як попередні так і державні випробування можуть бути як лабораторними (стендовими) так і полігонними (польовими).

Контрольні питання

1. Які основні стадії і етапи розроблення нового зразка приладу?
2. Які елементарні логічні методи конструювання використовуються?
3. Назвати види стандартів.
4. Які класифікаційні види стандартів існують?
5. Які вимоги пред'являються при проектуванні ОП?
6. Що містять ЗТУ на оптичний прилад?
7. Назвати основні стадії розроблення оптичного приладу.
8. Які види і типи схем існують?
9. Назвати правила оформлення функціональної і оптичної схем.
10. Які випробування приладів проводять?

РОЗДІЛ 2

ПРИНЦИПИ РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПРИЛАДУ ВИХОДЯЧИ З ВИМОГ ТОЧНОСТІ І НАДІЙНОСТІ

2.1. Поняття точності приладу. Класифікація похибок

Точність функціонування є однею з основних характеристик оптичного приладу. Забезпечення точності вимагає від конструктора знань джерел похибок ОП, уміння визначати їх вплив на точність, навиків розрахунку точності. Прилад має назву ідеального, якщо положення ланок приладу або сигнали на виході елементів приладу мають розрахункові (номінальні) значення. На практиці ідеальних приладів не існує. Всі прилади реалізують задану функціональну залежність з деяким наближенням. Такі прилади називаються реальними.

Кількісною мірою точності приладу є похибка, що є різницею розрахункового і дійсного значень відповідного параметра. Класифікація похибок проводиться по різних ознаках, які є незалежними одна від одної. Один з варіантів класифікації приведений далі.

Причини появи похибки

За цією ознакою похибки діляться на два види:

- методичні;
- інструментальні.

Методичні похибки обумовлені похибками в прийнятій теорії функціонування приладів, похибками у взаємному положенні приладу і об'єкта дослідження (це доприладові похибки). Цей вид похибок характерний для приладів заснованих на непрямих методах вимірів, наприклад, локаційних оптичних далекомірів.

Інструментальні похибки найбільш широкий клас похибок приладу. Цей клас ділиться на такі групи.

1. Теоретичні інструментальні похибки приладу, до яких відносяться допущення у функції перетворення приладу. Характер цих похибок можна розглянути на прикладі схеми автоколіматора, яка представлена на рис. 2.1.

Як видно з рисунка, при повороті дзеркала на кут α відбитий промінь відхилиться на кут 2α , а зрушення автоколімаційного зображення пов'язане з кутом вимірювання залежністю:

$$\frac{x}{f'} = \operatorname{tg} 2\alpha. \quad (2.1)$$

Тоді точна функція перетворення дорівнює:

$$\alpha_T = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{x}{f'}. \quad (2.2)$$

Враховуючи що кути малі, при градуюванні приладу можна використовувати наближену функцію перетворення:

$$\alpha_{\Pi} = \frac{x}{2f'}. \quad (2.3)$$

Тоді теоретична інструментальна похибка автоколіматора дорівнює

$$\Delta\alpha_{\text{теор}} = \alpha_T - \alpha_{\Pi}. \quad (2.4)$$

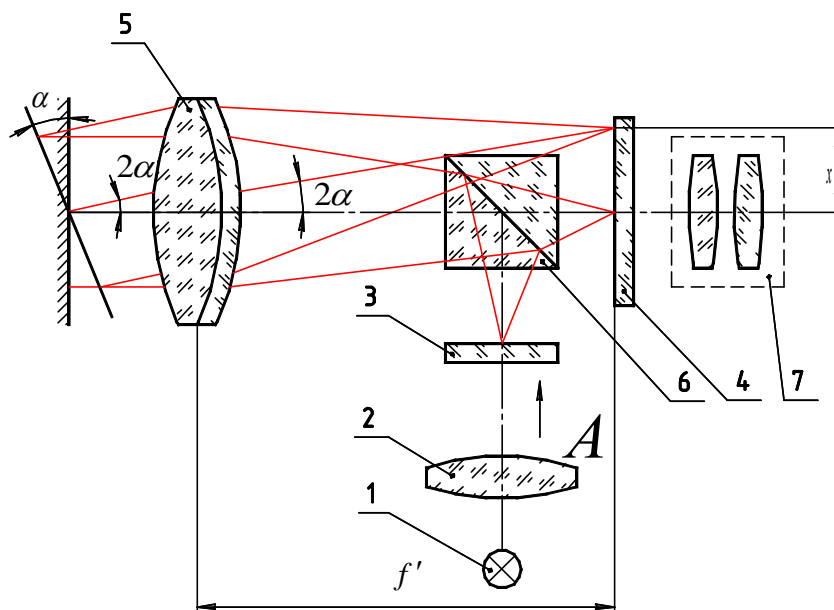


Рис. 2.1. Схема автоколіматора:

1 – джерело випромінювання; 2 – конденсор; 3 – тест-об'єкт; 4 – вимірювальна сітка;

5 – об'єктив коліматора; 6 – світлоподільна призма-куб; 7 – окуляр

Також до цих похибок відносяться округлення параметрів приладу до найближчих значень з ДСТУ. До них відносяться, наприклад, округлення радіусів кривизни лінз до ряду, що рекомендується. Теоретичними

інструментальними похибками є допущення в конструкціях вищих кінематичних пар

2. Похибки виготовлення і збірки елементів приладу найбільша група інструментальних похибок приладу. Ці похибки є технологічними і обумовлені відхиленням від розрахункових значень розмірів деталей, характеристик матеріалів, похибок розташування і форми деталей.

3. Експлуатаційні інструментальні похибки. Це похибки форми, розмірів, розташування деталей і зміни їх характеристик обумовленими впливом умов експлуатації (коливання температури, тиску, вологості, сили тертя, радіаційного випромінювання і таке інше).

4. Похибки реєстрації обумовлені втратами інформації при реєстрації результатів роботи приладу. Ці похибки, як правило, пов'язані з оператором, похибками прочитування результатів виміру, неправильною обробкою результатів виміру і тому подібними причинами.

Усі перераховані похибки є первинними похибками приладів і дорівнюють:

- похибка вхідного параметра приладу

$$\Delta x = x - x_0; \quad (2.5)$$

- похибка конструктивного параметра приладу

$$\Delta q = q - q_0; \quad (2.6)$$

- похибка конструктивного параметра обумовлена впливом умов експлуатації

$$\Delta q' = q' - q'_0, \quad (2.7)$$

де x, q, q' – дійсне значення відповідного параметра;

x_0, q_0, q'_0 – номінальне значення відповідного параметра.

Кожна первинна похибка певним чином впливає на похибку вихідних параметрів приладу. Цей вплив має назву часткового впливу первинної похибки і позначається відповідно $\Delta y_{\Delta x}; \Delta y_{\Delta q}; \Delta y_{\Delta q'}$. У свою чергу часткова похибка може бути визначена з наступного співвідношення:

$$\Delta y_{\Delta q} = A \Delta q, \quad (2.8)$$

де – A передавальна функція первинної похибки.

Для визначення передавальної функції використовується ряд методів:

- метод диференціювання;
- геометричний метод;
- метод розкладання функції перетворення в ряд;
- метод перетворення схеми пристрою;
- векторно-матричний метод;
- метод побудови плану швидкостей або малих пересувань.

За закономірності прояву при багатократних випробуваннях

За цією ознакою похибки поділяються на випадкові і невипадкові (систематичні). По результату дії похибки підрозділяють на ті, що надають випадкову і невипадкову дію на якість партії приладів і якість кожного приладу окремо.

Випадковими за своєю природою є похибки, що змінюються нерегулярно при багатократних випробуваннях. Вони не можуть бути визначені заздалегідь, але можуть характеризуватися статистичними характеристиками (математичним чеканням, дисперсією і іншими). Прикладом таких похибок є всі похибки технологічного характеру. Деякі випадкові похибки мають систематичну складову, обумовлену однобічним зрушенням поля допуску, що дорівнює:

$$\Delta_0 = 0,5(\Delta q_{\text{в}} + \Delta q_{\text{н}}), \quad (2.9)$$

де $\Delta q_{\text{в}}$ і $\Delta q_{\text{н}}$ – верхнє і нижнє граничне відхилення розмірів.

До систематичних похибок відносяться похибки, що не змінюються, або змінюються регулярно при багатократних випробуваннях. До таких похибок відносяться теоретичні інструментальні похибки або експлуатаційні, обумовлені дією стаціонарних температурних полів.

По характеру дії на якість приладу похибки можна розділити на ті, що надають випадкову і невипадкову дію. Цю класифікацію розглядають відносно до точності партії приладів або кожного приладу окремо. Деякі випадкові похибки (в основному технологічного походження), які

характеризують точність партії приладів для кожного окремого приладу після їх вимірів, можуть бути переведені в розряд систематичних.

За характером змін значень

За цією ознакою первинні похибки і чинники діляться на сталі, змінні регулярні, змінні нерегулярні, змішані. Сталі похибки не змінюються залежно від вихідного параметра приладу. До них відносяться похибки товщини лінз, кутів призм, децентрування і тому подібне. До змінних регулярних відносяться такі похибки, які змінюються регулярно залежно від вихідного параметра приладу. Змінні нерегулярні похибки змінюються нерегулярно залежно від вихідного параметра приладу. Змішані похибки містять ознаки трьох попередніх похибок.

За спрямованості дії

За цією ознакою похибки бувають векторними і скалярними. Векторні похибки характеризуються чисельним значенням і напрямом. Наприклад, ексцентриситет. Скалярні похибки характеризуються чисельним значенням і знаком, значення якого є визначеним.

За зв'язком між величиною часткової похибки і рівнем вихідного сигналу

Часткові похибки можуть бути такі:

- аддитивна

$$\Delta y_{\Delta q} = \text{const} ; \quad (2.10)$$

- мультиплікативна

$$\Delta y_{\Delta q} = k y , \quad (2.11)$$

де k – коефіцієнт пропорційності;

- періодична

$$\Delta y_{\Delta q} = a \sin k y ; \quad (2.12)$$

- степенна

$$\Delta y_{\Delta q} = k y^m . \quad (2.13)$$

Прикладом мультиплікативної похибки є похибка виміру кута автоколіматором. Як видно з формули (2.3) функція перетворення цього приладу дорівнює:

$$\alpha_{\Pi} = \frac{x}{2f'} . \quad (2.14)$$

За наявності похибки фокусної відстані похибка виміру кута дорівнює:

$$\Delta\alpha_{\Delta f} = \alpha \frac{\Delta f'}{f'} . \quad (2.15)$$

Як видно з (2.15) похибка виміру кута прямо пропорційна величині цього кута.

За умовами появи

Похибки бувають статичні і динамічні. Статичні похибки виникають в сталому режимі роботи, коли параметри на вході і виході приладу сталі. Динамічні похибки виникають в несталому режимі роботи. Під цією похибкою розуміють частину похибки, яка додається до статичної в несталому режимі роботи.

За розмірності

Похибки підрозділяють на абсолютні ($\Delta q = q - q_0$), відносні ($\frac{\Delta q}{q}$) і приведені ($\frac{\Delta q}{q_{\max}}$), де q_{\max} – діапазон вимірів.

2.2. Основне рівняння точності приладу

Це рівняння встановлює зв'язок між первинними похибками приладу і результуючою похибкою вихідного інформативного параметра. Для отримання цього рівняння запишемо рівняння функції перетворення приладу в загальному вигляді для розрахункових і дійсних значень відповідних параметрів. Розрахункове значення функції перетворення приладу дорівнює:

$$y_0 = f_0(x_{i_0}, q_{i_0}, q'_{i_0}) . \quad (2.16)$$

Дійсне значення функції перетворення приладу дорівнює:

$$y = f(x_i, q_i, q'_i) = f(x_{i_0} + \Delta x_i, q_{i_0} + \Delta q_i, q'_{i_0} + \Delta q'_i) , \quad (2.17)$$

де y_0 і y – розрахункове і дійсне значення вихідного параметра;

x_{i0} і x_i – розрахункове і дійсне значення вхідного параметра;

q_{i0} і q_i – розрахункове і дійсне значення конструктивного параметра;

q'_{i0} і q'_i – розрахункове і дійсне значення впливаючих чинників (температура, тиск);

Δx_i , Δq_i , $\Delta q'_i$ – похибки відповідних параметрів.

Результуюча похибка приладу дорівнює

$$\Delta y = y - y_0. \quad (2.18)$$

Для здобуття Δy відповідно до рівняння (2.18), скористаємося розкладанням рівняння (2.17) в ряд Тейлора, що має вигляд:

$$f(x_0 + \Delta x) = f(x_0) + \frac{\Delta x}{1!} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_0 + \frac{\Delta x^2}{2!} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right)_0 + \dots + \frac{\Delta x^n}{n!} \left(\frac{\partial^n f}{\partial x^n} \right)_0. \quad (2.19)$$

Враховуючи, що Δx мала величина, в розкладанні Тейлора можна обмежитися двома першими додатками. Всі інші є знехтовано малими. Індекс «0» означає, що часні похідні від функції перетворення потрібно брати для розрахункових значень відповідних параметрів без врахування похибок.

Якщо провести віднімання відповідно до рівняння (2.18), отримаємо:

$$\Delta y_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)_0 \Delta x_i + \sum_{i=1}^{\varphi} \Delta y_{\Delta i} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial q_i} \right)_0 \Delta q_i + \sum_{i=1}^p \left(\frac{\partial y}{\partial q'_i} \right)_0 \Delta q'_i, \quad (2.20)$$

де m – кількість методичних похибок приладу обумовлених похибками вхідних інформативних параметрів;

n – кількість інструментальних похибок приладу обумовлених похибками конструктивних параметрів;

p – кількість умов експлуатацій, що впливають на точність приладу;

φ – кількість наближень функцій перетворення приладу.

Рівняння (2.20) характеризує принцип незалежності дії первинних похибок, або принцип суперпозиції. Відповідно до цього принципу питання про одночасну дію декількох похибок можна вирішувати по частинах, визначивши спочатку окремі часткові похибки, а потім сумарну. Враховуючи те, що впливаючі чинники діють на вихідну похибку приладу через зміну конструктивних параметрів, то вираз для результуючої похибки приладу (2.20) необхідно записати в наступному вигляді:

$$\Delta y_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)_0 \Delta x_i + \sum_{i=1}^{\varphi} \Delta y_{\Delta i} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial q_i} \right)_0 \Delta q_i + \sum_{i=1}^l \left\{ \left(\frac{\partial y}{\partial q_i} \right)_0 \sum_{j=1}^p \left(\frac{\partial q'_i}{\partial q'_j} \right)_0 \Delta q'_j \right\}, \quad (2.21)$$

де l – кількість конструктивних параметрів, на які впливають умови експлуатації.

Якщо виявляється, що $\Delta y_{\Sigma} > \Delta y_{\text{дон}}$, то необхідно прийняти заходи по підвищенню точності приладу.

2.3. Методика виявлення похибок, що потребують компенсації.

Розрахунки характеристик компенсаторів похибок

Якщо необхідно вирішити питання про розробку компенсаторів похибок, необхідно знати міру впливу часткових похибок на результуючу похибку приладу. Ця міра впливу визначається коефіцієнтом впливу часткової похибки:

$$\lambda_i = \frac{\Delta y_{\text{дон}}}{\Delta y_{\Delta q}}, \quad (2.22)$$

де $\Delta y_{\text{дон}}$ – допустима результуюча похибка приладу;

$\Delta y_{\Delta q}$ – часткова похибка приладу, обумовлена первинною похибкою.

Якщо відома допустима результуюча похибка приладу і існує допустиме значення часткової похибки, то можна знайти допустиме значення коефіцієнта впливу часткових похибок із співвідношення:

$$\lambda_0 = \frac{\Delta y_{\text{дон}}}{(\Delta y_{\Delta q})_{\text{дон}}}. \quad (2.23)$$

Припустимо для коефіцієнта впливу i -ої похибки виконується співвідношення $\lambda_i < \lambda_0$, то це означає, що $(\Delta y_{\Delta q})_i > (\Delta y_{\Delta q})_{\text{дон}}$ і така похибка потребує компенсації.

Для визначення λ_0 необхідно скористатися співвідношенням [7]:

$$\lambda_0 = n_c + 0,5n_1 + \sqrt{0,25n_1 + n_2}, \quad (2.24)$$

де n_c – кількість систематичних похибок в приладі;

n_1 – кількість випадкових похибок з систематичною складовою;

n_2 – кількість випадкових похибок в приладі.

На практиці не всі похибки приладу є такими, що діють. Серед похибок можуть бути такі, які роблять дуже малі впливи на результуючу похибку. Такі похибки носять назву знехтовано малих похибок приладу. Для визначення знехтовано малих похибок приладу вводиться поняття коефіцієнта впливу знехтовано малих похибок, який дорівнює:

$$\lambda_n = \frac{\Delta y_{\partial on}}{(\Delta y_{\Delta q})_n}. \quad (2.25)$$

Якщо для коефіцієнта впливу i -ої похибки виконується співвідношення $\lambda_i > \lambda_n$, то це означає що $\Delta y_{\Delta q} < (\Delta y_{\Delta q})_n$. Отже, це означає, що дану похибку можна віднести до розряду знехтовано малих похибок. Для визначення λ_n можна скористатися наближеним співвідношенням $\lambda_n \approx 3\lambda_0$ [7].

Без врахування знехтовано малих похибок уточнене значення допустимого коефіцієнта впливу похибок приладу дорівнює:

$$\lambda'_0 = (n_c - n_{cn}) + 0,5(n_1 - n_{1n}) + \sqrt{0,25(n_1 - n_{1n}) + (n_2 - n_{2n})}, \quad (2.26)$$

де n_{cn} , n_{1n} , n_{2n} – кількість знехтовано малих похибок у відповідних групах.

Для остаточного ухвалення рішення з потреби компенсації i -ої похибки користуються нерівністю $\lambda_i < \lambda'_0$.

Для розрахунку характеристик компенсатора похибок слід визначити параметри недокомпенсації. Залишкова недокомпенсація часткової похибки дорівнює:

$$\Delta y_{нк} = \Delta y_{\Delta q} - \Delta y_{ком}, \quad (2.27)$$

де $\Delta y_{ком}$ – компенсуюча дія компенсатора;

$\Delta y_{\Delta q}$ – часткова похибка, яка компенсується.

Коефіцієнт впливу недокомпенсації дорівнює:

$$\lambda_{нк} = \frac{\Delta y_{\partial on}}{\Delta y_{нк}}. \quad (2.28)$$

Якщо $\lambda_{нк} > \lambda_0$ – компенсатор розроблений правильно. Якщо ж $\lambda_{нк} < \lambda_0$ – похибка не усунена, компенсатор розроблений неправильно.

Можуть бути визначені допустимі значення недокомпенсації, при цьому максимальне і мінімальне їх значення дорівнюють:

$$(\Delta y_{нк})_{\max} = \frac{\Delta y_{доп}}{\lambda'_0} ; \quad (2.29)$$

$$(\Delta y_{нк})_{\min} = \frac{\Delta y_{доп}}{\lambda_n} . \quad (2.30)$$

Якщо виходити з рівності (2.29) похибка, що компенсується, переводиться в розряд допустимих, а якщо ж виходити з рівності (2.30), то похибка, що компенсується, переводиться в розряд знехтовано малих. Тому перед розробкою наступного компенсатора потрібно уточнити значення $\lambda_0'^{1k}$, віднявши від похибок, що діють ті, що скомпенсовані. Правила уточнення значення коефіцієнта впливу $\lambda_0'^{1k}$ після введення першого компенсатора такі. Якщо за допомогою одного компенсатора усувається n похибок, то можливі такі випадки.

1. $\lambda_{нк} \setminus \lambda_n$ – тоді при розрахунку наступного компенсатора і при визначенні значення $\lambda_0'^{1k}$ всі ці похибки необхідно виключити з подальшого розрахунку, оскільки вони переведені в розряд знехтовано малих.

2. $\lambda_n \setminus \lambda_{нк} \setminus \lambda_0'$ – означає, що похибки переведені в розряд допустимих, але знехтовано малими не стали, тому з подальшого розрахунку виключається $n-1$ похибка.

3. $\lambda_{нк} \setminus \lambda_0'$ – означає, що конструкція компенсатора вибрана неправильно.

Після введення першого компенсатора коефіцієнти впливу похибок, що залишилися, необхідно порівнювати із значенням $\lambda_0'^{1k}$. Розрахунок на точність вважається закінченим, коли не залишилося похибок, для яких виконується наступна нерівність $\lambda_i \setminus \lambda_0'^{kk}$, де $\lambda_0'^{kk}$ – уточнений коефіцієнт впливу після введення k -го компенсатора.

При проведенні точностного розрахунку по цій методиці необхідно знати значення первинних похибок і значення часткових похибок. Значення систематичних первинних похибок визначають розрахунком, значення технологічних первинних похибок задають допусками на виготовлення і збірку приладів. Ці допуски визначають технологічність і вартість приладу. Розрізняють економічний, виробничий і технічний рівні точності.

Економічний рівень досягається в серійному виробництві на автоматичному універсальному устаткуванні і відповідає 9-11 квалітетам точності. Якщо на цьому рівні точність приладу досягти не можна, то переходять до виробничого рівня точності, який досягається на універсальному устаткуванні, але із застосуванням спеціального оснащення. Це відповідає 6–8 квалітетам. Найвищий рівень відповідає технічному рівню точності, який може бути досягнутий лише на спеціальному устаткуванні і відповідає 4–5 квалітетам точності.

Послідовність розрахунку на точність приладу наступна.

1. Розглянути схему і конструкцію приладу.
2. Виявити первинні похибки приладу.
3. Систематизувати похибки, розділивши їх на групи, n_1 , n_2 і n_c .
4. Визначити λ_0
5. Визначити λ_n .
6. Визначити передавальні функції похибок.
7. Визначити значення первинних похибок.
8. Визначити часткові похибки і їх коефіцієнти впливу.
9. Виявити знехтовано малі похибки.
10. Уточнити значення λ_0 , визначивши λ'_0 .
11. Виявити похибки, що вимагають компенсації.
12. Запропонувати конструкцію компенсатора. В першу чергу розробити такий компенсатор, який водночас усуває декілька похибок.
13. Уточнити значення λ'_0 , визначивши значення $\lambda_0'^{1k}$.
14. Прийняти рішення про необхідність розроблення другого компенсатора на підставі порівняння коефіцієнтів впливу похибок, що залишилися, з коефіцієнтом $\lambda_0'^{1k}$
15. Продовжити розроблення компенсаторів доки дотримуватиметься нерівність $\lambda_i < \lambda_0'^{kk}$.

2.4. Методи підвищення точності при проектуванні оптичних приладів

Застосовуються три основних методи підвищення точності приладів:

- технологічний;
- проектний;
- компенсаційний.

Технологічний метод заснований на тому, що при виготовленні приладу використовують матеріали з більш високим показником з якості, застосовуються джерела і приймачі вищої якості, призначаються жорсткіші допуски на розміри деталей і вузлів. Недоліком цього методу є підвищення вартості приладу.

Проектний метод заснований на раціональному розподілі допусків і параметрів приладу, зміні конструкцій деталей або вузлів, зміні схеми або принципу дії приладу. Перевагою методу є можливість його використання на етапі розроблення проектної документації приладу.

Компенсаційний метод найчастіше застосовується за конструювання високоточних оптичних приладів. Застосовуються три методи компенсації похибок приладів [8]:

- технологічний;
- організаційно-технічний;
- конструкторський.

Технологічний метод полягає в додатковій обробці деталей приладів, а також в регулюваннях і юстуваннях в процесі збірки. Додаткова обробка деталей має назву пригоном або доведенням (шабрування, притирання, розгортання і тому подібне). Метод застосовується тоді, коли потрібно отримати високу надійність компенсації. Наприклад, при точному базуванні дзеркал в інтерферометрах.

Організаційно-технічний метод полягає в селекції деталей, у введенні поправок, рандомізації похибок, перерахунку оптичної системи приладу на плавки скла. Наприклад, селекція об'єктивів і окулярів при збірці біноклів.

Рандомізація похибок шляхом переводу систематичних похибок у випадкові. Подальше підвищення точності може бути досягнуте збільшенням кількості вимірів, наприклад в кутовимірювальних лімбах в теодолітах.

Конструкторські методи полягають в розробленні ступінчастих компенсаторів похибок, плавних регулювальних пристроїв, що дають змогу компенсувати похибки елементів приладу або що зменшують безпосередньо похибку вихідного інформативного параметра приладу (гвинтові, ексцентрикові механізми). Компенсатори переважно зменшують вихідну похибку через зміну конструктивних параметрів приладів.

2.5. Теоретико-вірогідносний підхід за оцінювання точності приладу

Якщо похибки приладу є випадковими, то передбачити їх значення заздалегідь не можливо. В той же час середні значення цих похибок мають певні значення, які характеризують ймовірнісними величинами. У статичному режимі похибки приладів є випадковими величинами, а в динамічному режимі – випадковими функціями. Для випадкових величин основними характеристиками є закони розподілу. Відомо два види законів розподілу випадкових похибок: інтегральний і диференціальний.

Інтегральний закон розподілу $F(\Delta x)$ встановлює залежність між фіксованою величиною Δx похибки і вірогідністю того, що будь-яке її значення Δx не перевищує Δx . Вигляд цього закону ілюструє рис. 2.2, а аналітична залежність наступна:

$$F(\Delta x) = P(\Delta X \leq \Delta x) \quad . \quad (2.31)$$

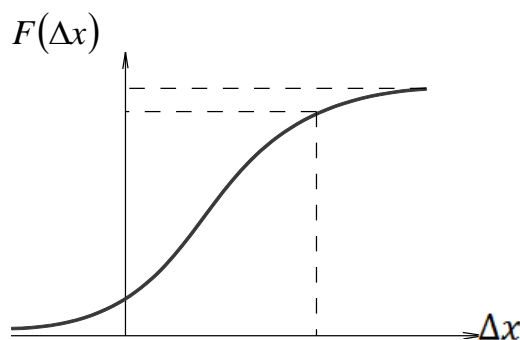


Рис. 2.2. Інтегральний закон розподілу похибок

Як видно з рисунка

$$\lim_{\Delta x \rightarrow \infty} F(\Delta x) = 1, \quad (2.32)$$

$$\lim_{\Delta x \rightarrow -\infty} F(\Delta x) = 0. \quad (2.33)$$

Недолік цього закону в тому, що він має обмежену інформативність і не показує, яка кількість похибок відповідає тій або іншій вірогідності. Більш інформативним є диференційний закон розподілу, який є похідною від інтегрального закону розподілу і носить назву щільності вірогідності появи похибок. Цей закон характеризується залежністю:

$$f(\Delta x) = \frac{dF(\Delta x)}{d(\Delta x)}. \quad (2.34)$$

Закон характеризує вірогідність того, що випадкова похибка Δx розташована в інтервалі похибок $\Delta x_1 \div \Delta x_2$ (Рис. 2.3).

Тобто аналітично отримаємо:

$$P(\Delta x_1 < \Delta x < \Delta x_2) = \int_{\Delta x_1}^{\Delta x_2} f(\Delta x) d\Delta x. \quad (2.35)$$

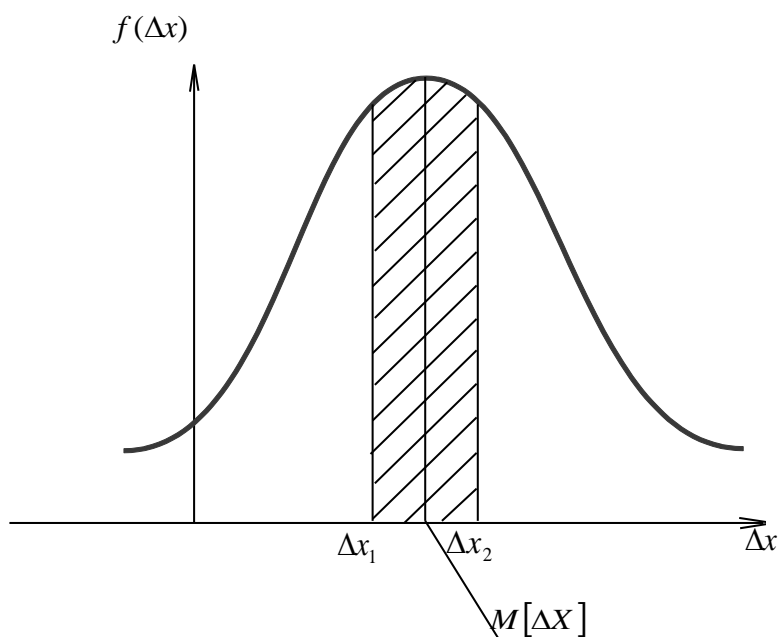


Рис. 2.3. Диференційний закон розподілу похибок

Умовою нормування цього закону є виконання наступного співвідношення:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(\Delta x) d\Delta x = 1. \quad (2.36)$$

Різні технологічні процеси виготовлення деталей характеризується різними законами розподілу випадкових похибок. На практиці ці закони отримують побудовою гістограм з подальшою їх апроксимацією.

Для виконання точносних розрахунків використовують числові характеристики законів розподілу. Основними є:

- математичне чекання похибки $M[\Delta x]$;
- дисперсія похибки $D[\Delta x]$.

Додатковими є:

- середнє квадратичне відхилення $\sigma[\Delta x]$;
- гранична похибка $\Delta[\Delta x]$.

Математичне чекання або середнє значення похибки характеризує положення центру групування випадкових величин. Теоретично для безперервних випадкових похибок $M[\Delta x]$ визначається із співвідношення:

$$M[\Delta x] = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta x f(\Delta x) d\Delta x. \quad (2.37)$$

На практиці $M[\Delta x]$ наближається до середнього арифметичного значення і має назву оцінки математичного чекання:

$$\tilde{M}[\Delta x] = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n}. \quad (2.38)$$

Дисперсія похибки $D[\Delta x]$ характеризує розкид випадкової величини відносно середнього значення і характеризує форму кривої диференційного закону розподілу похибок. Математично дисперсія може бути отримана для безперервних випадкових похибок на основі співвідношення:

$$D[\Delta x] = \int_{-\infty}^{\infty} (\Delta x - M[\Delta x])^2 f(\Delta x) d\Delta x. \quad (2.39)$$

На практиці $D[\Delta x]$ може бути обчислена оцінкою дисперсії, яка визначається відповідно до формули Беселя:

$$\tilde{D}[\Delta x] = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i - \tilde{M}[\Delta x])^2}{n-1}. \quad (2.40)$$

Допоміжні характеристики закону розподілу визначаються із співвідношень:

$$\sigma[\Delta x] = \pm \sqrt{D[\Delta x]}, \quad (2.41)$$

$$\Delta[\Delta x] = \gamma \sigma[\Delta x], \quad (2.42)$$

де γ – коефіцієнт, що залежить від вигляду закону розподілу випадкової похибки.

Існують різні види диференціальних законів розподілу похибок. Закон рівної ймовірності має місце, наприклад, коли проводяться округлення чисел до найближчого цілого значення. Для цього закону розподілу основні характеристики визначаються співвідношеннями:

$$M[\Delta x] = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{2}; \quad (2.43)$$

$$\sigma[\Delta x] = \frac{\Delta x_2 - \Delta x_1}{2\sqrt{3}}; \quad (2.44)$$

$$\Delta[\Delta x] = \frac{\Delta x_2 - \Delta x_1}{2}. \quad (2.45)$$

Вигляд закону розподілу представлено на рис. 2.4.

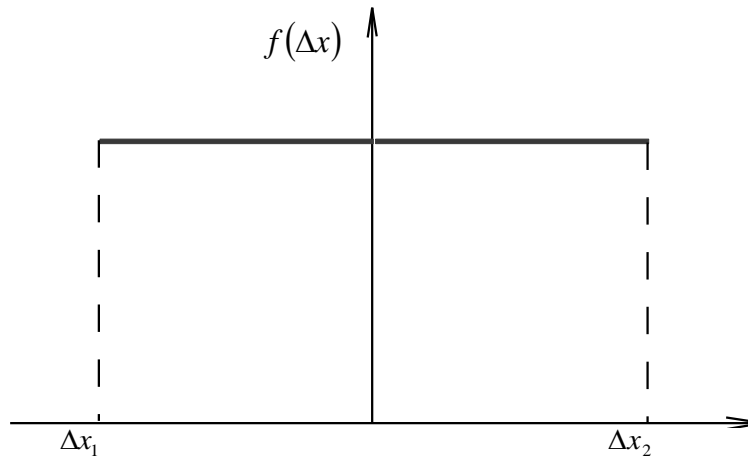


Рис. 2.4. Закон рівної ймовірності

Закон розподілу Сімпсона або закон трикутника показано на рис. 2.5.

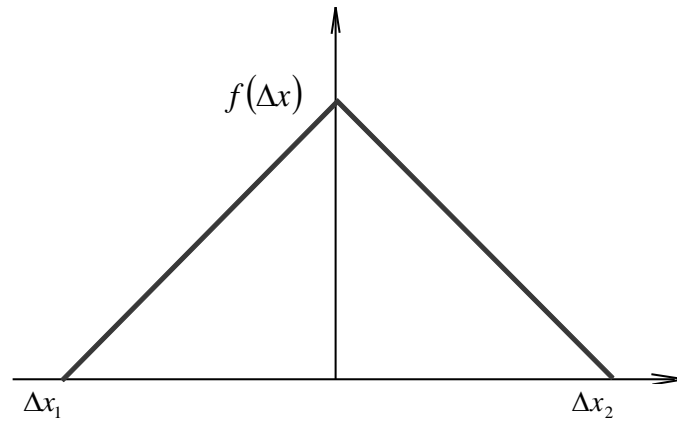


Рис. 2.5. Закон розподілу Сімпсона

Нормальний закон розподілу похибок або закон Гауса найчастіше зустрічається на практиці. Обґрунтуванням цього закону є теореми Ляпунова, які показують, що сума великого числа незалежних випадкових похибок, що підпорядковуються яким завгодно законам розподілу за відсутності явного переважання однієї похибки над іншими, приблизно підкоряється нормальному закону розподілу. Щільність вірогідності появи похибок для цього закону розподілу визначається співвідношенням:

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma[\Delta x]} \cdot e^{\frac{-(\Delta x - M[\Delta x])^2}{2\sigma^2[\Delta x]}}. \quad (2.46)$$

Вигляд закону розподілу показаний на рис. 2.6.

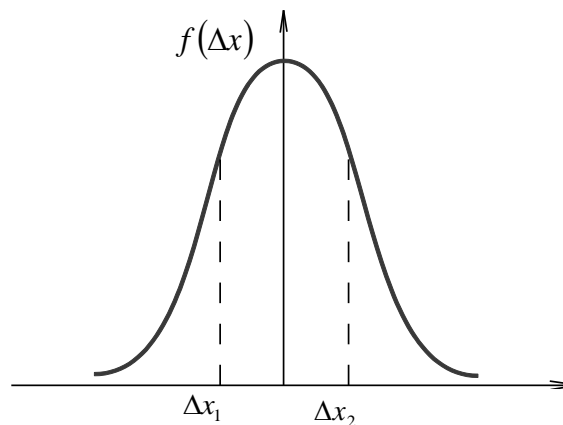


Рис. 2.6. Нормальний закон розподілу похибок

Аналіз цього закону показав, що вірогідність появи випадкових похибок у відповідних інтервалах така:

$$\begin{aligned}
& -\sigma[\Delta x] \langle \Delta X \rangle \sigma[\Delta x] = 0.683, \\
& -2\sigma[\Delta x] \langle \Delta X \rangle 2\sigma[\Delta x] = 0.955, \\
& -3\sigma[\Delta x] \langle \Delta X \rangle 3\sigma[\Delta x] = 0.977.
\end{aligned}$$

Гранична похибка для такого закону $\Delta(\Delta x) = \pm 3\sigma[\Delta x]$, тобто $\gamma = 3$. Це правило носить назву правила трьох сигм.

При точносних розрахунках із застосуванням числових характеристик випадкових похибок необхідно використовувати такі теореми теорії вірогідності.

1. $M[c] = C$, де C – не випадкова величина.
2. $D[c] = 0$.
3. $M[c \cdot \Delta x] = c \cdot M[\Delta x]$.
4. $D[c \cdot \Delta x] = c^2 \cdot D[\Delta x]$.
5. $M[\Delta x + \Delta y] = M[\Delta x] + M[\Delta y]$,

де Δx і Δy – незалежні випадкові величини.

6. $D[\Delta x + \Delta y] = D[\Delta x] + D[\Delta y]$.

На підставі цих теорем для математичного чекання і дисперсії часткових похибок отримаємо формули

$$M[\Delta y_{\Delta q}] = A \cdot M[\Delta q], \quad (2.47)$$

$$D[\Delta y_{\Delta q}] = A^2 D[\Delta q], \quad (2.48)$$

де A – не випадкова величина, а саме передавальна функція випадкової похибки.

Найбільшого поширення на практиці набули такі методи розрахунку точності: max-min, квадратичного підсумовування, Ренча, вірогідносний, Монте-Карло. Під час розрахунку за методом max-min випадковим похибкам привласнюються граничні значення допусків, а результат їх дії знаходять алгебраїчним підсумовуванням при найнесприятливішому їх поєднанні. При цьому

$$\Delta y_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (A_{qi} \Delta q_i) \max \quad (2.49)$$

Цей метод розрахунку дає завищене значення сумарної похибки відносно до того, що виходить на практиці, оскільки вірогідність того, що всі похибки набудуть граничних значень знехтовано мала.

Результуючу похибку за методом квадратичного підсумовування визначають за формулою:

$$\Delta y_{\Sigma} = \sqrt{\sum_i^n (A_{qi} \sigma_{q_i})^2} . \quad (2.50)$$

Цей метод дає занижене значення сумарної похибки оскільки тут не враховуються систематичні складові випадкової похибки і вигляд закону розподілу. Коли систематичних складових немає цей метод дозволяє отримати значення сумарної похибки близьке до реального.

Розрахунок за методом Ренча усуває завищеність і заниженість значень Δy_{Σ} оскільки дозволяє знайти результат, як середнє геометричне між алгебраїчним підсумовуванням і квадратичним підсумовуванням:

$$\Delta y_{\Sigma} = \sqrt{\left(\sum_i^n (A_{qi} \Delta q_i)\right)_{\max} \sqrt{\sum_i^n (A_{qi} \sigma_{q_i})^2}} . \quad (2.51)$$

Розрахунок за методом Ренча дає задовільний результат, коли всі випадкові первинні похибки підпорядковуються нормальному закону розподілу і мають систематичні складові, що дорівнюють половині їх поля допуску. За наявності більшого числа випадкових похибок, що не мають, або мають незначні систематичні складові, цей метод дає завищений результат.

Вірогідносний метод дозволяє отримати правильніший результат, оскільки він заснований на правилах підсумовування випадкових величин і враховує наявність систематичних складових випадкових похибок і вигляд закону розподілу останніх:

$$\Delta y_{\Sigma} = \sum_i^{n_1} A_{qi} C_{pi} \delta q_i + \sqrt{\sum_i^{n_1+n_2} (A_{qi} K_{pi} \delta q_i)^2} , \quad (2.52)$$

де C_{pi} – коефіцієнт, що враховує систематичну складову закону розподілу; K_{pi} – коефіцієнт, що враховує відхилення закону розподілу похибки від закону Гауса.

Теоретично найбільш точний результат дозволяють отримати методи статистичного моделювання, наприклад, метод Монте-Карло. При цьому

моделюються випадкові значення первинних похибок, розподілених в полі допуску по заданому закону

2.6. Поняття надійності приладів. Характеристики надійності

Надійність – це властивість приладу зберігати в часі у встановлений час значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати деякі функції в заданих режимах і умовах експлуатації при правильному технічному обслуговуванні, ремонті, умові зберігання і транспортування. Надійність приладу залежить від кількості і якості елементів, що до нього входять, від умов роботи (температура, тиск), технології виготовлення і інших чинників. Властивості, що характеризують надійність: безвідмовність, довговічність, ремонтопридатність та інші.

Безвідмовність – це властивість приладу безперервно зберігати працездатний стан в перебігу деякого часу або деякого напрацювання.

Довговічність – це властивість приладу зберігати працездатний стан до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту.

Ремонтотпридатність – це властивість приладу, що полягає в пристосованості до попередження і виявлення причин виникнення відмови, до підтримки і відновлення працездатності приладу шляхом проведення технічного обслуговування і ремонту.

Відмови бувають раптові (пробій конденсатора) і поступові (зміна чутливості приймача випромінювання).

Розрахунок надійності приладу можливий, якщо відомі кількісні показники надійності: термін служби (ТС) приладу, напрацювання, технічний ресурс (ТР), середнє напрацювання, вірогідність безвідмовної роботи приладу і інтенсивність відмов.

ТС – календарна тривалість від початку експлуатації приладу до переходу його в граничний стан, що відповідає технічній неможливості його подальшої експлуатації (з врахуванням простою приладу).

Напрацювання – тривалість або об'єм роботи приладу.

ТР – напрацювання приладу від початку його експлуатації з врахуванням її відновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

Такі характеристики як середній час напрацювання T_{cp} , вірогідність безвідмовної роботи $P(t)$, інтенсивність відмови $\lambda(t)$ визначають на підставі статистичних даних при випробуванні партії приладів [9].

Середній час напрацювання дорівнює:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n_0}, \quad (2.53)$$

де n_0 – число приладів, поставлених на випробування;

t_i – відрізок часу роботи до відмови i -го приладу.

Вірогідність безвідмовної роботи – це вірогідність того, що в межах заданого інтервалу часу за певних умов експлуатації приладу відмови приладу не настає.

Якщо відома вірогідність безвідмовної роботи $P_i(t)$ елементів що входять в прилад, то $P_{np}(t)$ всього приладу визначається як добуток :

$$P_{np}(t) = P_1(t) * P_2(t) * \dots * P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (2.54)$$

де n – кількість елементів приладу.

Якщо $P_{np} \geq 0,9$, то тоді замість співвідношення (2.54) можна скористатися співвідношенням:

$$P_{np}(t) = 1 - \sum_{i=1}^n Q_i(t), \quad (2.55)$$

де $Q_{i(t)}$ – вірогідність відмови приладу.

Зв'язок між $P_{(t)}$ і $Q_{(t)}$ наступний:

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (2.56)$$

Середній час напрацювання на відмову пов'язаний з вірогідністю безвідмовної роботи співвідношенням:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (2.57)$$

Для визначення значення $P_{(t)}$ за результатами випробувань приладу користуються наступним співвідношенням:

$$P(t) = \frac{n_0 - n(t)}{n_0}, \quad (2.58)$$

де n_0 – число приладів поставлених на випробування;

$n(t)$ – число приладів, що відмовили на момент часу t .

Інтенсивність відмови показує, яка доля справних в початковий момент даного проміжку часу приладів вибірки відмовляє в кінці цього проміжку:

$$\lambda(t) = \frac{n(t, \Delta t)}{(n_0 - n(t))\Delta t}, \quad (2.59)$$

де $n(t)\Delta t$ – кількість приладів, що відмовили за інтервал часу Δt на момент часу t .

За результатами випробувань будують лямбда-характеристику приладу, яка може мати наступний вигляд:

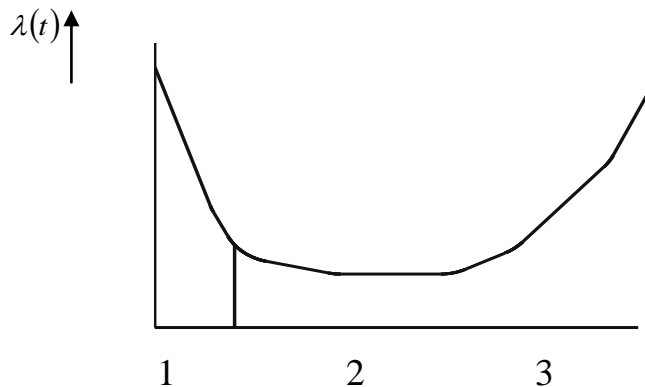


Рис.2.7. Лямбда-характеристика приладу

На рис. 2.7 показано: 1 – область прироблення приладу, яка характеризується високою інтенсивністю відмови внаслідок наявності прихованих дефектів виробництва, які не вдалося виявити при контролі технологічного процесу; 2 – область робочого стану приладу; 3 – область старіння (зносу) приладу. Для зменшення відмови при експлуатації приладу на підприємстві проводять тренування приладу в перебіг часу, що відповідає області 1.

Якщо відома інтенсивність відмов окремих елементів приладу $\lambda_i(t)$, то інтенсивність відмови всього приладу дорівнює:

$$\lambda_{np}(t) = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) + \dots + \lambda_n(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t). \quad (2.60)$$

Величина $\lambda_i(t)$ є довідковою величиною і як правило вказується для номінальних умов експлуатації. Якщо умови експлуатації приладів відрізняються від номінальних, то необхідно вводити поправочні коефіцієнти:

$$\lambda(t)_T = \alpha_T \lambda(t)_{\text{ном}}, \quad (2.61)$$

де α_T – коефіцієнт, що характеризує відмінність умов експлуатації приладу від номінальних, наприклад, при зміні температури.

Оскільки відмови приладів носять випадковий характер, а випадкові величини підпорядковуються різним законам розподілу, то розрахунок надійності проводять з врахуванням цих законів. В більшості випадків вірогідність безвідмовної роботи підпорядковується експоненційному закону або закону Релея. Для цих законів основні характеристики надійності приладів визначаються співвідношеннями приведеними в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Співвідношення для визначення характеристик надійності приладу

Найменування закону	$P(t)$	$\lambda(t)$	T_{cp}
Експоненціальний закон	$e^{-\lambda t}$	$\lambda = const$	$\frac{1}{\lambda}$
Закон Релея	$e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$\lambda = \frac{t}{\sigma^2}$	$\sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma$

У табл. 2.1 σ – середнє квадратичне відхилення закону розподілу

2.7. Засоби підвищення надійності приладів

Для підвищення надійності приладу конструктор застосовує ряд методів. Один з них це резервування, тобто використання додаткових елементів в приладі з метою збереження його працездатності при відмові якого-небудь елементу. Розрізняють постійне, динамічне, навантажене, ненавантажене і

полегшене резервування. З врахуванням резервування, коли основний і резервний елементи мають однакову надійність, вірогідність безвідмовної роботи дорівнює:

$$P(t)_p = 1 - [1 - P(t)]^{m+1}, \quad (2.62)$$

де m – кратність резервування;

$P(t)$ – вірогідність безвідмовної роботи нерезервованого елемента.

Окрім цього для підвищення надійності приладу застосовуються:

- полегшення режимів роботи;
- вдосконалення технологій;
- спрощення конструкції приладу;
- використання інтегральних технологій;
- використання сучасної елементної бази.

Контрольні питання

1. Поняття точності і похибки приладу.
2. Класифікація первинних похибок приладу.
3. Назвати види теоретичних інструментальних похибок приладу.
4. Які методи використовують для визначення передавальних функцій первинних похибок?
5. Що таке часткові похибки і як вони класифікуються?
6. Що входить в основне рівняння точності приладу?
7. Які види коефіцієнтів впливу часткових похибок визначають за оцінювання точності приладу?
8. Від чого залежать значення λ і λ'_0 ?
9. Методика розрахунку компенсаторів похибок.
10. Послідовність розрахунку приладу на точність.
11. Як можна підвищити точність приладу?
12. Назвати характеристики вірогідносної оцінки точності приладу.
13. Особливості нормального закону розподіла первинних похибок.
14. Поняття надійності приладу.
15. Основні характеристики надійності.

РОЗДІЛ 3

ОСНОВИ КОНСТРУЮВАННЯ ДЕТАЛЕЙ І З'ЄДНАНЬ

3.1. Структурні елементи деталей. Вибір матеріалу, форми, визначення розмірів

За функціональним призначенням деталі ділять на:

- основні, що забезпечують роботу приладу;
- додаткові, що забезпечують функціонування деталей першої групи;
- допоміжні, призначені для управління приладом.

За рівнем типізації деталі відносять до:

- стандартних (кріплення);
- типових за формою, що розрізняються лише розмірами (лінзи);
- спеціальних, що розробляються заново для кожного приладу.

Кожну деталь розділяють на три структурні елементи:

- робочий елемент (РЕ), що виконує основне функціональне призначення деталі;
- базовий елемент (БЕ), призначений для приєднання даної деталі до базової;
- вільний елемент (ВЕ), який поєднує в одне ціле робочий і базовий елементи.

На рис. 3.1 і рис. 3.2 показано приклади структурних елементів деталей.

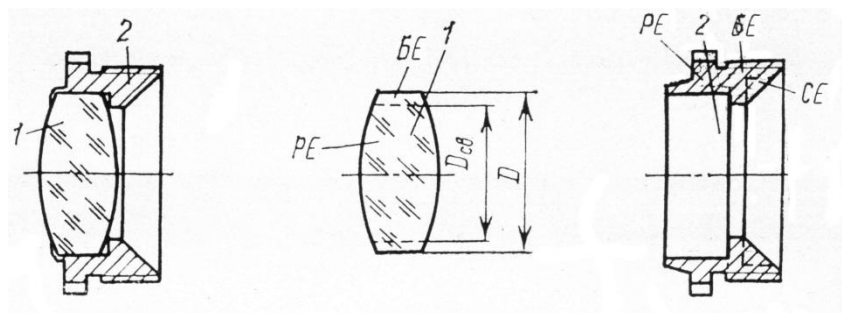


Рис. 3.1. Структурні елементи деталей вузла кріплення об'єктиву:

1 – лінза; 2 – оправа

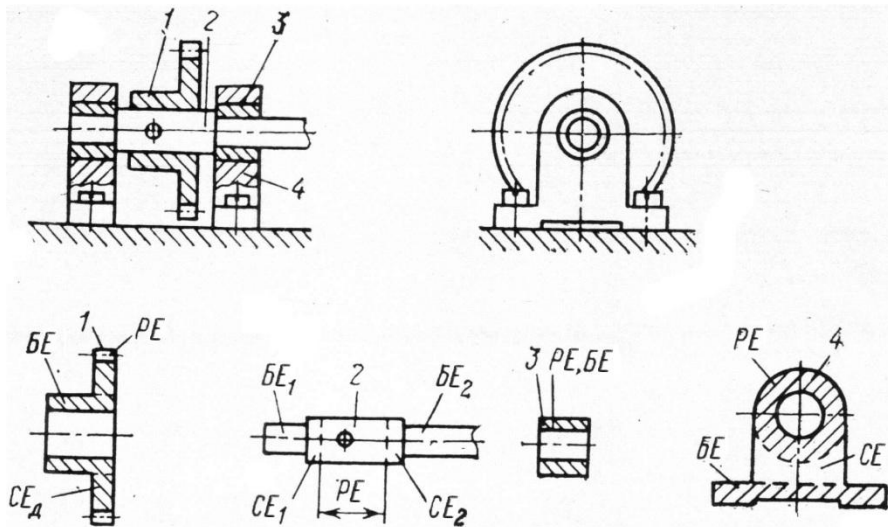


Рис. 3.2. Структурні елементи деталей вузла монтажу зубчатого колеса:

1 – зубчате колесо; 2 – вісь; 3 – втулка; 4 – кронштейн

Основними ознаками деталі є:

- матеріал;
- форма;
- розмір.

У вирішенні цих трьох завдань, тобто у виборі матеріалу, форми і розміру полягає процес конструювання деталі. При цьому вибір матеріалу, форми і розміру залежить від структурного елементу деталі. Показники, за якими оцінюються конструкція деталі діляться на три групи:

- експлуатаційна (жорсткість, міцність, точність);
- конструктивна (маса, габарити, естетичність);
- технологічні параметри (характеризують технологічність конструкції).

Вибір матеріалу базується на досвіді конструктора. У тому випадку, коли розробляються спеціальні деталі і пошук оптимального рішення по вибору матеріалу складний можна використовувати матрицю оптимального вибору матеріалу. Приклад побудови такої матриці при виборі матеріалу оправи лінзи наведено в [5]. Рішення про вибір матеріалу приймається на підставі максимальної кількості балів набраних матеріалом за показниками характеристик з врахуванням вагових коефіцієнтів. Показники характеристик і вагові коефіцієнти визначаються експертами.

Форма деталі визначається формами поверхонь, що обмежують деталь (площина, циліндр, сфера, параболоїд, еліпсоїд). При виборі форми поверхні керуються наступними критеріями:

- функція деталі;
- конструктивна доцільність;
- технологічність;
- естетичність.

Функція деталі робить вплив на вибір поверхонь робочого і базового елементів, що з'єднуються. Вона мало впливає на вибір форми вільного елемента. Конструктивна доцільність в основному стосується мінімізації об'єму деталі, при визначенні припусків на кріплення. Технологічність враховує можливість технології для здобуття необхідної точності при мінімумі витрат. При цьому враховуються такі фактори:

- чим більше параметрів у поверхні, тим менше точність;
- результуюча точність безперервного процесу (наприклад, шліфування циліндра) вища, ніж дискретного (наприклад, шліфування широкої плоскої поверхні);
- із збільшенням протяжності поверхні знижується точність її обробки.

Естетичність форми деталей характеризують гармонійність її пропорцій. Одним з проявів гармонії є симетрія. Крім того, застосовується пропорціонування елементів форми на основі ряду пропорційних чисел. «Золоте відношення» характеризується відношенням сторін прямокутника 0,612:1; 1,618:1.

Геометричні розміри залежать від відношення до того або іншого структурного елемента. Крім того, існують розміри що координують положення РЕ відносно БЕ. Розміри РЕ визначають в основному з умов точності. Розміри БЕ визначають з умови точності орієнтування вільних елементів. Розміри ВЕ визначаються з умов загальної міцності і жорсткості деталі. Визначення розмірів засноване на поєднанні методу вибору і розрахунку. Загальні вихідні умови такі:

- обмеження габаритних розмірів визначених ТЗ;

- тенденції компактності і мініатюризації;
- конструктивна і функціональна доцільність (нічого зайвого);
- економічність.

3.2. Типи з'єднань деталей та вибір методу з'єднань. Класифікація та характеристики контактних пар

З'єднання двох або декількох деталей є складальною одиницею. Деталі, що з'єднуються, утворюють собою контактну пару. Розрізняють з'єднання нерухомі і рухомі. За функціональним призначенням з'єднання бувають такі, що базують і робочі. Ті, що базують, застосовують частіше і слугують для орієнтування деталей. Робочі беруть участь у виконанні функцій приладу, щоб поєднання контактної пари не порушувалося в процесі роботи, воно піддається замиканню силоміць, формою, кріпленням.

Нерухомі з'єднання завжди є такими, що базують. В їх створенні беруть участь базовий елемент деталі, що несе, і робочий елемент деталі, що приєднується. Нерухомі з'єднання найбільш багаточисельні в загальній конструкції приладу. Приклади нерухомих з'єднань показані на рис. 3.3.

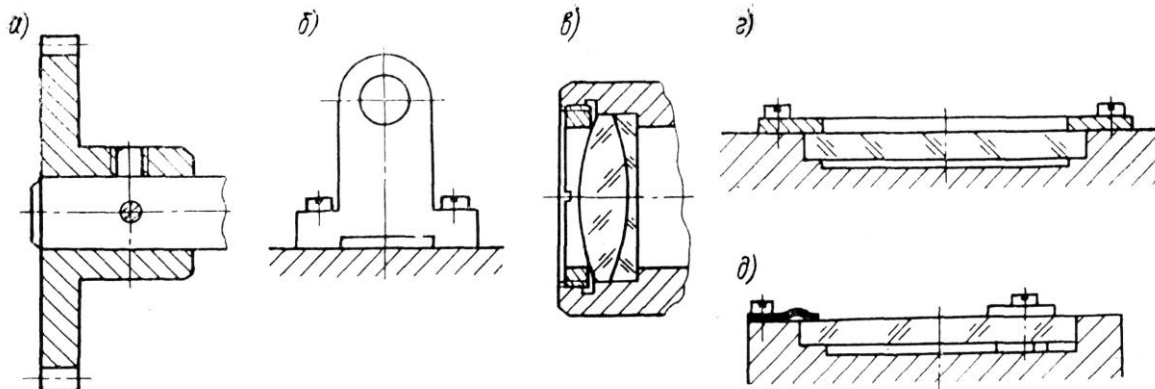


Рис. 3.3. Нерухомі з'єднання деталей:

- а* – зубчасте колесо з валиком; *б* – кронштейн з плоскою поверхнею базової деталі;
в – об'єktiv з оправою; *г, д* – дзеркало з оправою

Рухомі з'єднання бувають такими, що базують і робочими. Ті, що базують, призначені для підтримки рухомих елементів кінематичних пар і напряму їх руху. Приклади рухомих з'єднань для обертального руху показані на рис. 3.4.

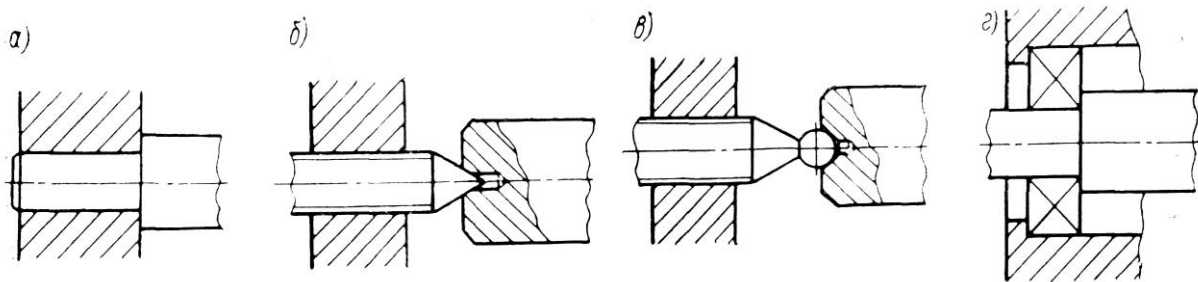


Рис. 3.4. Рухомі з'єднання для обертального руху:

а – циліндрове; *б* – центрове; *в* – сферичне; *г* – шарикопідшипникове

Рухомі з'єднання для поступальної ходи показані на рис. 3.5.

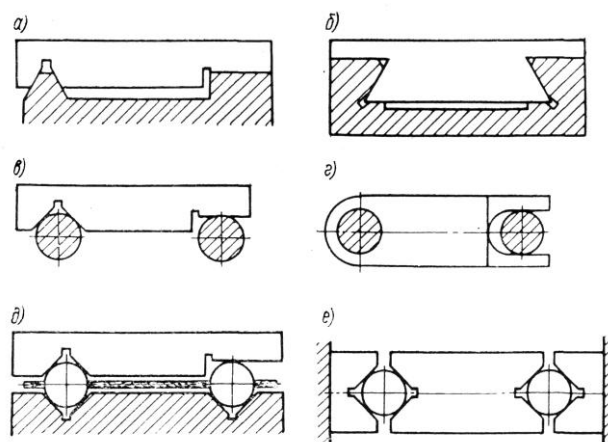


Рис. 3.5. Рухомі з'єднання для поступальної ходи:

а – призматичні V-образні направляючі з замиканням силоміць; *б* – призматичні направляючі з замиканням формою типу ластівкового хвіста; *в* – циліндрові направляючі з замиканням силоміць; *г* – циліндрові направляючі з замиканням формою; *д* – кулькові направляючі з замиканням силоміць; *е* – кулькові направляючі з замиканням формою

Робочі рухомі з'єднання призначено для перетворення і передачі руху. Призначення замикання в з'єднанні полягає в обмеженні можливості зсуву деталі, що приєднується відносно базової по обмежуваному напрямку. Це замикання забезпечує існування з'єднань. Схематичне зображення трьох способів замикання показане на рис. 3.6.

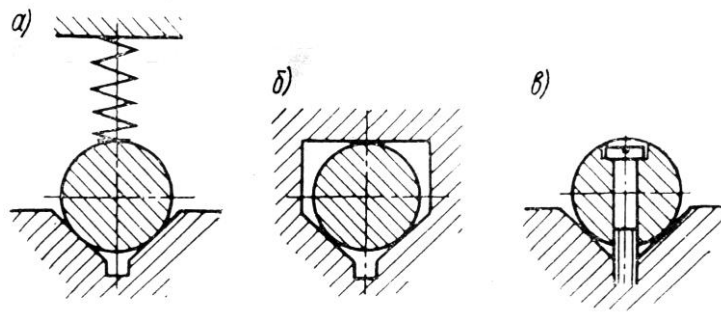


Рис. 3.6. Способи замикання з'єднання деталей:

a – силоміць; *б* – формою; *в* – кріпленням

Перевагами силового замикання є:

- не чутливість до коливань температури середовища;
- відсутність зазорів.

Недоліками є:

- погіршення силового режиму роботи;
- ускладнення конструкції з'єднання.

Замикання формою або матеріальною поверхнею найчастіше застосовується за конструювання з'єднань, особливо за конструювання кінематичних пар. Перевагами замикання формою є:

- надійність;
- незалежність від орієнтації конструкції в просторі.

Недоліком замикання формою є неминучість зазору в з'єднанні. Замикання кріпленням застосовується лише для нерухомих з'єднань.

За конструювання приладів є деякий набір перевірених практикою можливих конструкторських рішень. Тому в більшості випадків за конструювання нових приладів користуються методом аналогії на основі досвіду конструктора. У виняткових випадках доводиться вирішувати задачу вибору з'єднань і тоді буде корисним використання матриці для вирішення певного конструкторського завдання. Приклад побудови такої матриці приведений в [6]. Потрібно, наприклад, вибрати спосіб кріплення об'єктиву з ряду відомих, якщо конструкція працює в складному температурному і динамічному режимах і його роль в оптичній системі невелика. Можливі варіанти вирішення цієї конструкторської задачі представлені на рис. 3.7.

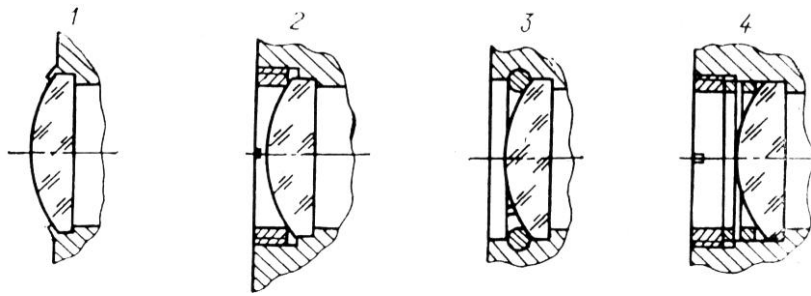


Рис. 3.7. Способи кріплення оптичних деталей круглої форми:

1 – завальцовкою; 2 – затискним кільцем; 3 – розрізним кільцем; 4 – затискним і пружинячим кільцями

На підставі поставленого завдання експертами визначаються потрібні характеристики з'єднання і їх вагові коефіцієнти. Потім з врахуванням цих коефіцієнтів визначається сума балів різних способів кріплення. Як показано найбільш придатний варіант з'єднання затискним кільцем [5].

Цілеспрямованим з'єднанням деталей відповідно до креслень забезпечується визначеність їх взаємного орієнтування і працездатність конструкції. Досягнення визначеності орієнтування одне з основних завдань конструювання. Визначеність орієнтування пов'язана з обмеженням деяких ступенів свободи деталі. Всього таких ступенів шість: пересування по трьом вісям і повороти відносно тих же вісей. У конструкції приладів деталі позбавлені, як правило, всіх шести ступенів свободи. Рідко деталі мають одну ступень свободи і дуже рідко більш за одну ступень свободи. Обмежувані ступіні свободи називаються зайвими. При конструюванні з'єднань необхідно наперед знати наступне:

- скільки ступенів свободи в деталей потрібно обмежити;
- скільки ступенів свободи може обмежити та або інша конструкція.

Ці основні завдання розбиваються на декілька частин:

- визначення необхідного і достатнього числа зв'язків, що накладаються на деталь;
- вибір найбільш прийнятних форм зв'язків;
- оптимізація конструкції зв'язків, що обмежують зсуви і повороти.

Матеріальні зв'язки, за допомогою яких обмежуються зайві ступені свободи деталі називаються контактними парами. Контактні пари, що

обмежують одну або дві ступені свободи, називаються вищими контактними парами і позначають $P1$ і $P2$. Контакт деталей, що з'єднуються, в цих парах можливий по крапці або по лінії. Такі пари застосовуються в основному в рухомих з'єднаннях. Контактні пари, що обмежують три – п'ять ступенів свободи позначають $P3$, $P4$, $P5$ і називають нижчими контактними парами. В реальних конструкціях вони грають домінуючу роль. Важливою властивістю елементарних контактних пар є їх еквівалентність, яка полягає в тому, що пари нижчих класів можуть бути замінені парами вищих класів.

3.3. Основи базування деталей. Геометрична невизначеність та перетворення класів контактних пар. Надлишкове базування

Основну масу з'єднань складають базуючі:

- нерухомі в системах, що несуть;
- рухомі в базуючих кінематичних парах.

Модель процесу конструювання базуючих з'єднань наступна.

1. Формулюється завдання, яке потрібно вирішити.
2. Визначається тип деталі, яка базується (призма, циліндр).
3. Виявляються види і число зайвих ступенів свободи деталі, що базується.
4. Встановлюють конструктивні обмеження (наприклад, обумовлені особливостями компоновки приладу).
5. Вибирається схема базування і види контактних пар.

Вибір контактного варіанту схеми базування залежить від силового і динамічного режимів роботи з'єднань. Найчастіше застосовують варіанти базування призматичних тіл зображених на рис. 3.8. із зв'язками: а) $P3$, $P2$ і $P1$; б) $P3$ і $P1$; в) $P1$. Схема в) забезпечує найбільшу геометричну визначеність базування.

При базуванні тіл циліндричної форми завжди залишається одна ступень свободи в деталі, що базується (обертання довкола вісі).

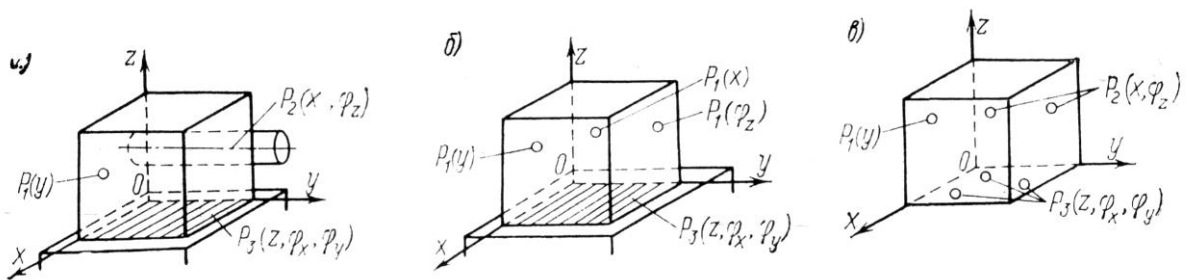


Рис. 3.8. Вихідні схеми базування призматичних тіл із зв'язками:

a – P_3 , P_2 і P_1 ; *б* – P_3 і P_1 ; *в* – P_1

Схеми варіантів базування тіл циліндричної форми на рис. 3.9. Найбільш часто застосовують варіанти показані на рис. 3.9. *a* і *б*.

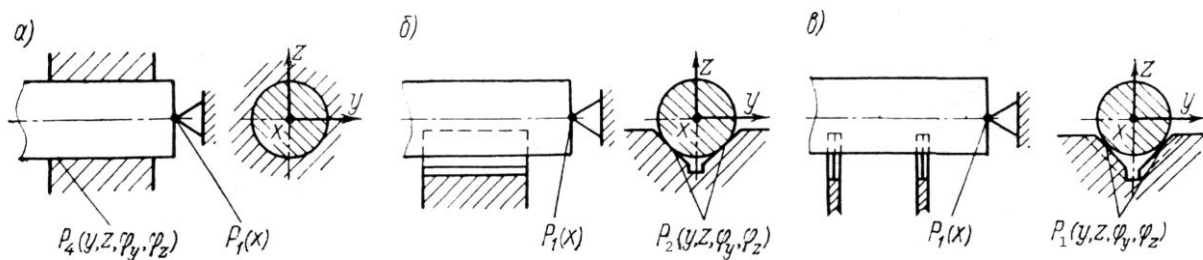


Рис. 3.9. Вихідні схеми базування тіл циліндричної форми із зв'язками:

a – P_4 і P_1 ; *б* – P_2 і P_1 ; *в* – P_1

Схеми варіантів базування тіл сферичної форми представлені на рис. 3.10.

При базуванні тіл сферичної форми, як видно з рисунка, є три види контактів з'єднання по:

- поверхні;
- лінії;
- крапках.

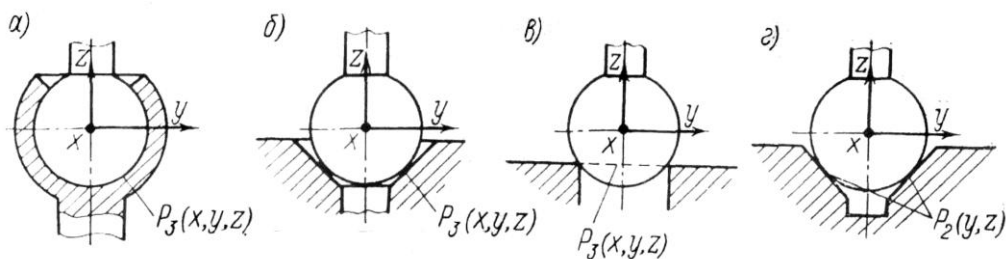


Рис. 3.10. Вихідні схеми базування тіл сферичної форми:

a – з одним зв'язком P_3 ; *б* – по конічній поверхні (зв'язок P_3); *в* – по кромці циліндричного отвору (зв'язок P_3); *г* – по призматичній канавці (зв'язок P_2)

Розглянемо обмеження пов'язані з геометричною невизначеністю контактних пар. Ця невизначеність обумовлена тим, що контури і розміри площин контакту відрізняються від номінальних внаслідок похибок форми і шорсткості поверхонь, що з'єднуються як це показано на рис. 3.11. Контакт по крапці є прямою малого розміру l_n , а контакт по лінії має деяку ширину і розриви по довжині, розпадаючись на ряд плям. Таким чином всі види контакту мають геометричну невизначеність.

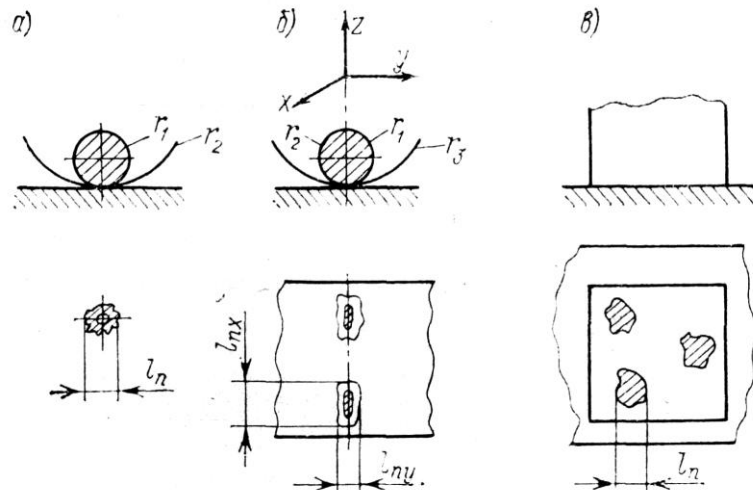


Рис. 3.11. Геометрична невизначеність контакту реальних поверхонь при контакті:

a – по крапці; *б* – по лінії; *в* – по площині

Ця геометрична невизначеність знижує точність з'єднання і здатність нести навантаження. Наприклад, довжина повзуна в направляючих показаних на рис. 3.12 визначена з умови обмеження поворотів повзуна при русі довкола вісі ОУ за формулою

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta q}{B_{xp}}, \quad (3.1)$$

де Δq – похибка, що спричиняє поворот повзуна;

B_{xp} – розрахункова довжина повзуна.

Внаслідок невизначеності положення плям контакту дійсна похибка положення повзуна зростатиме пропорційно $\frac{B_{xp}}{B_{xd}}$. З метою підвищення точності роботи з'єднання в реальних конструкціях роблять вибірки на поверхнях, що з'єднуються.

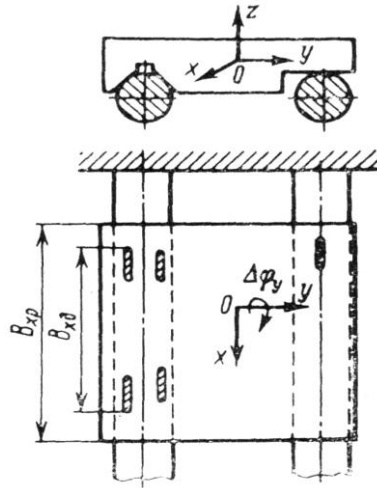


Рис. 3.12. Геометрична невизначеність контакту у циліндрових направляючих

Розміри виступів роблять рівними розмірам плям контактів, щоб в межах виступу не було розриву контактуючих поверхонь. Використання вибірок не змінює клас контактної пари. Перехід до перетворених контактних пар позбавляє деталь тих же ступенів свободи, які були і до перетворення. На рис. 3.13 показано виборки зроблені в різних контактних парах.

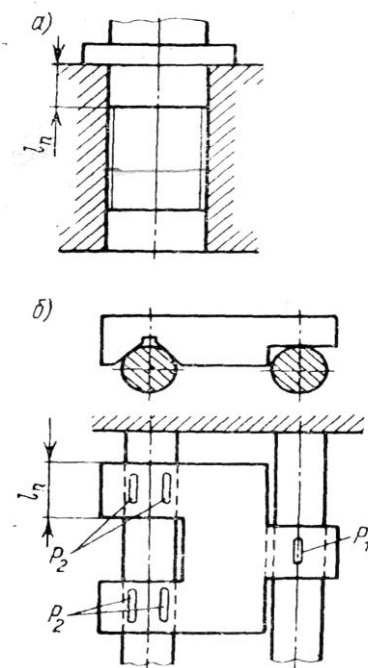


Рис. 3.13. Підвищення геометричної визначеності контакту за допомогою конструктивних вибірок: *а* – в циліндровій контактній парі; *б* – в контактній парі поступального руху

Базування валиків або вісей відповідно до рис. 3.14 на радіальну кільцеву опору малої товщини можна розглядати як контактну пару класу P2.

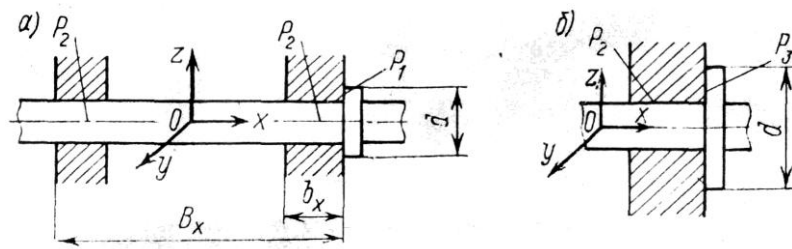


Рис. 3.14. Базування валиків:

a – по циліндру (зв'язок P4) і буртику (зв'язок P1); *б* – по циліндричному пояску (зв'язок P2) і фланцю (зв'язок P3)

Для обмеження зайвих ступенів свободи може бути застосована ще одна опора і фланець малого діаметру, що обмежує осьове пересування. У іншому варіанті, ступені свободи, що залишилися, віднімаються фланцем великого розміру. Для деталей призматичної форми найбільш характерне базування по площинах. Оптимальною по геометричній визначеності для цих деталей є схема базування представлена на рис. 3.15. Деталь, що базується, показана на рисунку штрихами у вигляді призми. Найбільш близькі до оптимальної схеми конструкції призматичних направляючих поступальної ходи приведені на рис. 3.15 б. При цьому $B_z \leq B_y$.

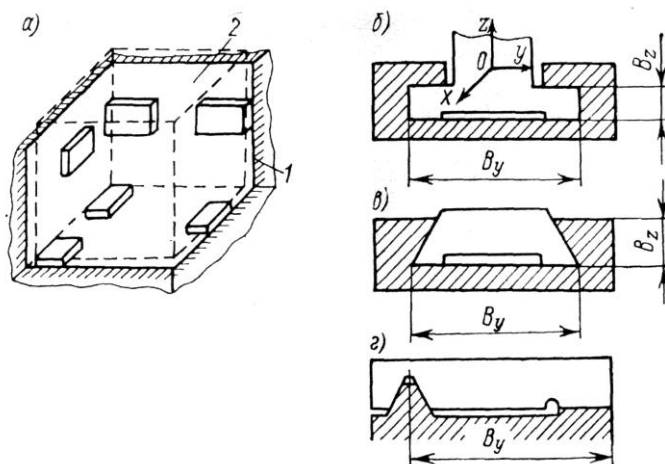


Рис. 3.15. Базування деталей призматичної форми:

a – заміна точкових зв'язків P1 площинами виступів на поверхнях, що з'єднуються ;
б, г – призматичні направляючі поступальної ходи

Базування є геометрично невизначеним або недостатнім, коли вибрана схема базування і поєднання контактних пар для її реалізації не забезпечує однозначне обмеження зайвих ступенів свободи деталі, що базується. Характерною ознакою такого базування є необхідність виконання комплексу регулювань положення деталі при використанні додаткових засобів для фіксації цього положення. Наприклад, на рис. 3.16 для надійної фіксації деталі при гвинтовому з'єднанні використовуються штифти.

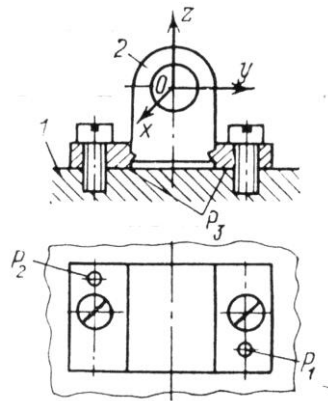


Рис. 3.16. Нерухоме базування кронштейна на площині:

1 – базуюча деталь; 2 – кронштейн

На рис. 3.17 показані варіанти конструкції призматичних направляючих з різною визначеністю вихідного базування. Варіанти мають такі особливості:

- а – має найбільшу невизначеність базування і характерний для штучного виробництва, оскільки містить велику кількість регулювань;
- б – характерний для серійного виробництва при вимозі до зазору на технічному рівні точності;
- в – варіант масового виробництва при менш жорстких вимогах до точності.

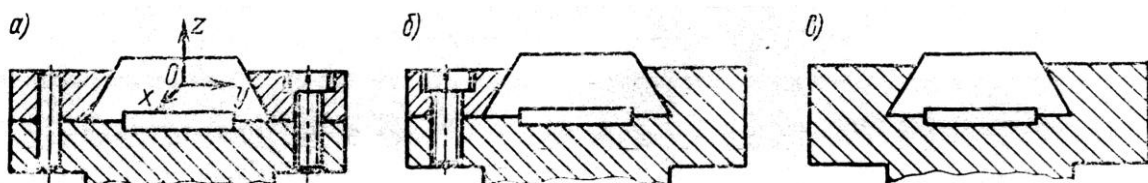


Рис. 3.17. Варіанти конструкції призматичних направляючих

3.4. Методика визначення та способи усунення надлишкових зв'язків. З'єднання оптичних деталей з механічними

У елементах оптичних систем, зважаючи на високі вимоги до точності базування, характерне широке використання недостатнього вихідного базування, що допускає юстування у вигляді дуже малих зсувів з подальшою фіксацією. Базування призми на рис. 3.18 б передбачає високоточне базування при пересуванні по вісях X і Y і поворот відносно вісі Z з подальшою фіксацією трьома обмежувальними планками. Якщо вимоги до точності базування не високі, то можна базувати призму як показано на рис. 3.18 а, яке простіше попереднього. При базуванні силових оптичних елементів, як правило, застосовується подовжнє юстування. Схема подовжнього юстування по рис. 3.18 в може бути застосована, коли вимоги до точності подовжньої установки не перевищують величини 30 мкм. Коли вимоги вищі, використовується варіант базування по рис. 3.18 з, де в оправі об'єктиву застосовано різьблення з малим кроком.

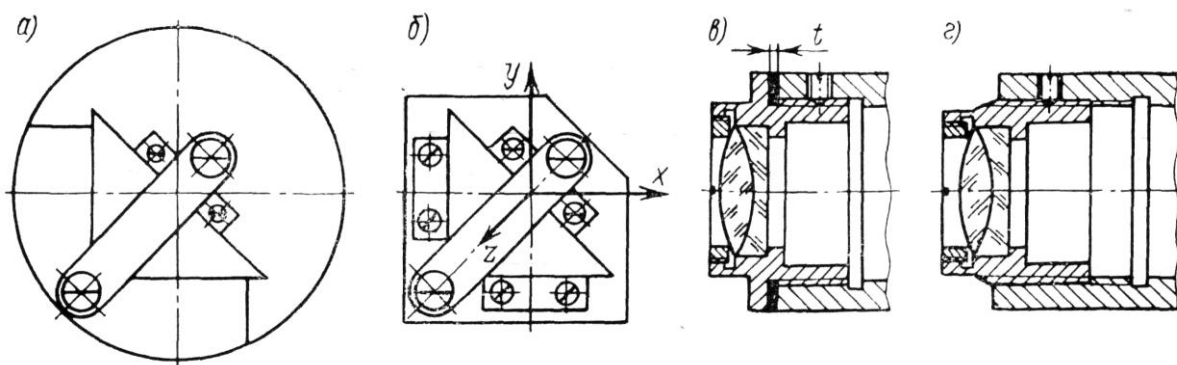


Рис. 3.18. Базування елементів оптичних систем:
а, б – відбивної призми; в, г – лінзової системи

Базування має назву надлишкового, коли зайві ступені свободи деталі, що базується, обмежуються більше одного разу, тобто віднімаються не одним, а декількома зв'язками. Зайві зв'язки називають надлишковими. Вони погіршують якість з'єднання, ускладнюють збірку, погіршують силовий режим і обумовлені наявністю технологічних похибок розмірів, форми і положення елементів, що базуються. На рис. 3.19 в показано приклад надлишкового поперечного базування валика по координатних вісях Z і Y , а

на рис. 3.19 *з*; *д* приклади надлишкового базування втулки в направляючих обертальній і поступальній ходи.

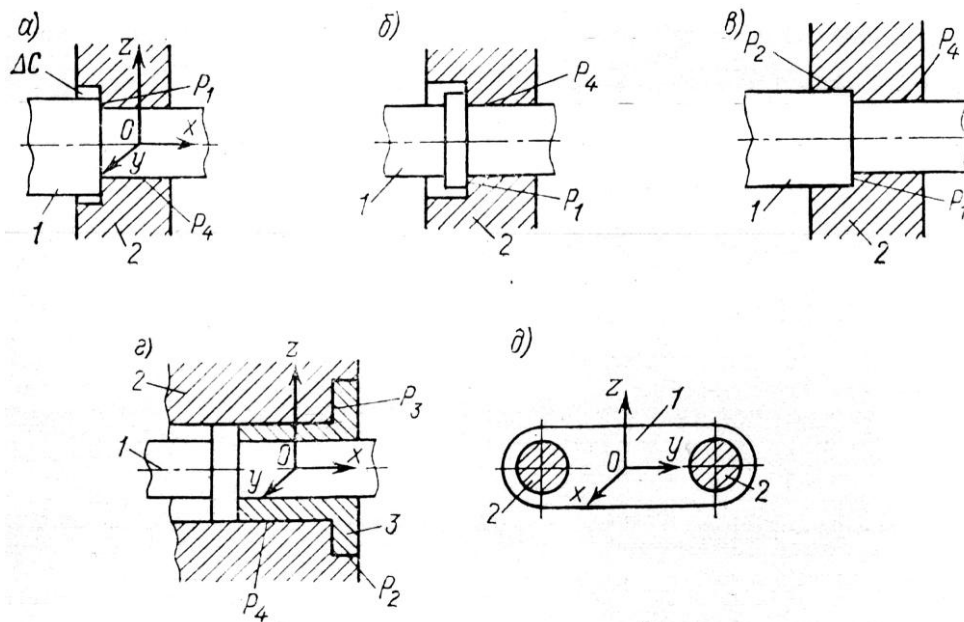


Рис. 3.19. Приклади надлишкового базування

Конструкції з'єднань з надлишковими зв'язками в разі замикання з'єднань формою мають назву статично невизначених. Ця невизначеність може привести до заклинювання деталі при русі. Загальна умова для уникнення статичної невизначеності наступна: для обмеження кожної зайвої ступені свободи деталі необхідно і досить прикласти лише один зв'язок.

На рис. 3.20 *а* і *б* приклади надлишкового базування для нерухомих з'єднань при замиканні з'єднань кріпленням. Невизначеність базування обумовлена похибками форми контактуючих площин. Щоб уникнути цього досить зробити вибірку на одній з контактуючих деталей, як це показано на рис. 3.20 *в*.

Якщо не вдається уникнути надлишкових зв'язків, для усунення їх дії використовують спеціальні засоби:

- використання зазорів і малих контактних деформацій;
- використання систем, що самовстановлюються (рис. 3.21 *а*, *б*);
- спільна обробка елементів з'єднань (рис. 3.21 *в*), що з'єднуються.

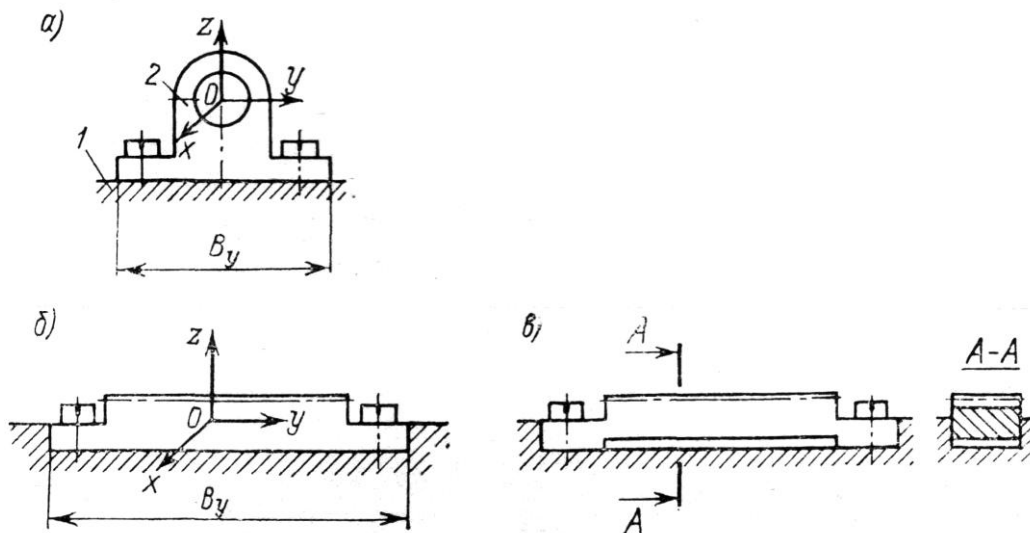


Рис. 3.20. Надлишкове базування при замиканні кріпленням

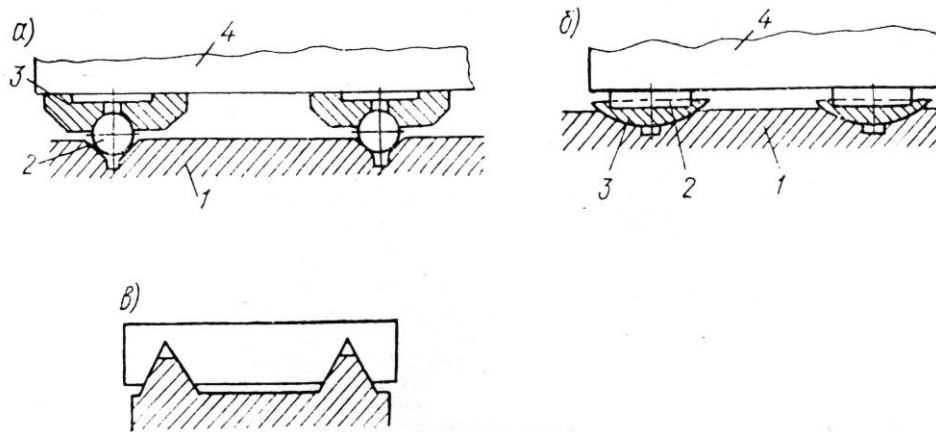


Рис. 3.21. Способи компенсації надлишкових зв'язків:

1 – основа; 2 – сфера або призма; 3 – опорна деталь; 4 – столик

Визначимо, яке значення має взаємне орієнтування базуючих елементів контактних пар різних типів на прикладі деяких схем базування. Для обмеження кожного із зсувів досить накласти один точковий зв'язок класу Р1. Розглянемо дію такого зв'язку у випадку, коли обмежується зсув по вісі Х деякого призматичного тіла. При базуванні деталі за схемою, що показана на рис. 3.22 а) для точної її установки, тобто виключення похибок положення ΔX і ΔZ , досить мати три точкових опори. В результаті похибки виготовлення деталі Δq , при ідеальній перпендикулярності граней деталі до точок опори, похибка її положення уздовж вісі Х дорівнює:

$$\Delta X_{\Delta q} = \Delta q \quad (3.2)$$

В разі відхилення від перпендикулярності на кут ε похибка положення деталі уздовж вісі X дорівнює:

$$\Delta X_{\Delta q} = \left(\frac{1}{\cos \varepsilon} \right) \cdot \Delta q \quad . \quad (3.3)$$

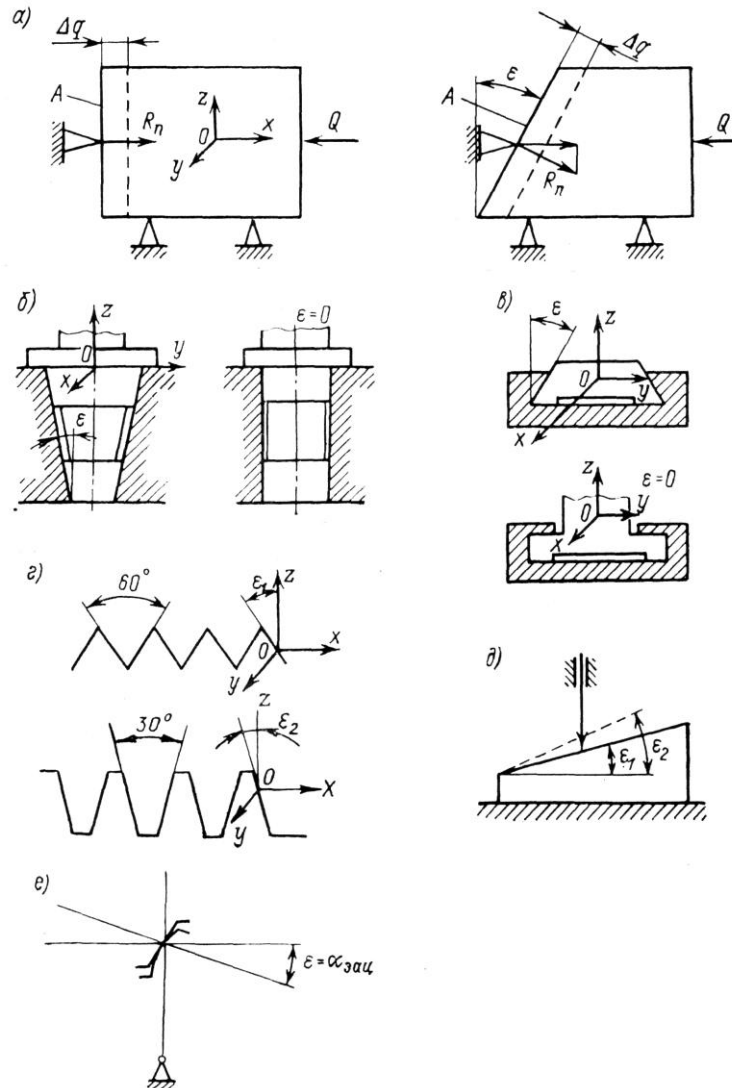


Рис. 3.22. Орієнтування елементів контактних пар зв'язків, що обмежують зсуви

Це ж положення стосується і сил, що діють на опору в першому і другому випадках:

$$R_n = Q; \quad R_n = \left(\frac{1}{\cos \varepsilon} \right) \cdot Q \quad (3.4)$$

За відсутності нахилу похибка положення має мінімальне значення. Отже базуючі поверхні, що обмежують зсув деталі слід орієнтувати

нормально до напрямку що обмежує зсув – це фундаментальний принцип для конструювання базуючих з'єднань. В реальних конструкціях перевагу треба віддавати варіантам представленим на рис. 3.22 б і в при $\varepsilon = 0$. Точність гвинтового механізму з трапецеїдальним різьбленням з тих же міркувань на 11% вище, ніж з гострокутним різьбленням. Для обмеження поворотів в будь-якому напрямку, необхідно і досить накласти на деталь, що базується, два зв'язки класу Р1 або зв'язок класу Р2 у вигляді прямої лінії.

За наявності похибки виготовлення опори або деталі, що базується, на величину Δq , як це показано на рис. 3.23, можливий поворот деталі на кут $\Delta\varphi_x$, який дорівнює:

$$\Delta\varphi_x = \left(\frac{1}{B_y} \right) \Delta q \quad . \quad (3.5)$$

Для обмеження поворотів деталі, що базується, відповідно до рис. 3.23, зв'язки необхідно розташовувати на можливо великому базисі. Цей принцип носить назву принципу обмеження поворотів і має фундаментальне значення для конструювання базуючих з'єднань.

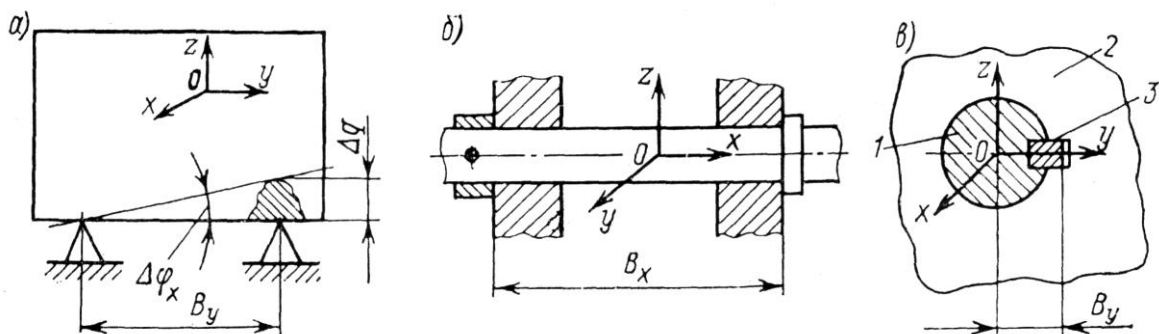


Рис. 3.23. Орієнтування елементів контактних пар, що обмежують повороти:

1 – вал; 2 – тіло довільної форми; 3 – шпонка

Якщо до деталі, яка базується, прикладений осьовий момент, наприклад у з'єднанні шпонки рис. 3.23 в, то збільшення базису поліпшує силовий режим з'єднання.

Під час конструювання з'єднань оптичних деталей з механічними враховують такі особливості.

1. Вихідною умовою є нерухомість з'єднання.

2. Конструкція оптичної деталі відома заздалегідь, тому конструювання з'єднання зводиться до розроблення базової механічної деталі.
3. У зв'язку з вимогами до точності взаємного розташування в таких з'єднаннях широко застосовують регулювання.

Принципи орієнтування і базування оптичних деталей круглої і плоскої форми пояснює рис. 3.24. Для позбавлення круглої оптичної деталі п'яти ступенів свободи використовують два базуючі елементи деталі:

- опорний у напрямку вісі деталі зв'язок P_3 позбавляє пересувань $(X, \varphi_y, \varphi_z)$;
- вузький центруючий поясок зв'язок P_2 позбавляє пересувань (X, Y) .

Якщо необхідно забазувати склеєний оптичний блок, коли висота блоку сорозмірна з діаметром, то не можна всі склеяні оптичні деталі робити одного діаметру, оскільки циліндр перетворюється в зв'язок класу P_4 . Більший діаметр робиться для тієї деталі, яка чутливіша до децентрувань.

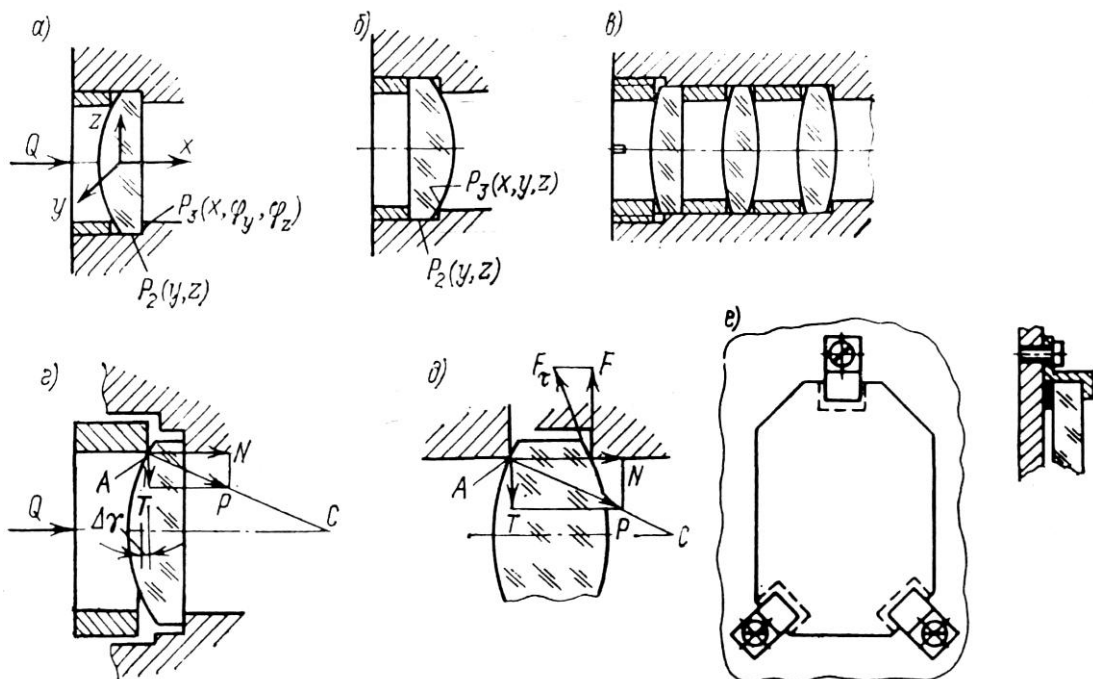


Рис. 3.24. Базування оптичних деталей

Особливу роль для точності базування лінз набуває спосіб її закріплення, оскільки в певних умовах притиску виникає поперечне зрушення лінзи або її нахил. Рис. 3.24 з, внаслідок децентрувань різьбового кільця виникає зусилля у напрямі вісі, що приводить до зрушення лінзи в межах зазору. Якщо лінза стримується в оправі лише за рахунок тертя, то поперечне зрушення лінзи завжди неминуче, отже, вимога до точності виготовлення і базування притискного кільця повинні відповідати вимогам точності центрування лінзи. Виходячи з цих міркувань кріплення лінз завальцовкою переважніше. Під час завальцовки лінзу додатково центрують.

Базування плоских оптичних деталей проводиться по поверхнях і для виключення невизначеності базування дзеркала і призми переважно кріпляться на три крапки, а в місцях кріплення дзеркал встановлюють прокладки з фольги.

Значну роль при конструюванні з'єднань відіграють рівні точності технологічних процесів. Розрізняють ці процеси за наступними ознаками.

1. Виду контактних пар з'єднання: збірка вищих кінематичних пар P_1 і P_2 вимагає більшої точності взаємного узгодження елементів пари, чим нижчих.
2. По об'ємах і видах пригонів деталей під час збірки розрізняють:
 - типові пригони (шабрення, спільне притирання);
 - спеціальні (індивідуальні доведення).
3. За об'ємом і виглядом регулювань:
 - просте узгодження деталей (для кріплення).

Контрольні питання

1. За якими ознаками діляться деталі?
2. Які критерії враховують при виборі матеріалу, форми і розмірів деталі?
3. Типи з'єднань деталей та їх приклади.
4. Переваги і недоліки різних типів з'єднань.
5. Контактні пари для обмеження ступенів свободи деталей.
6. Схеми базування призматичних, циліндричних і сферичних деталей.

7. У чому полягає геометрична невизначеність контактних пар і як її позбутися?
8. У чому полягає надлишкове базування?
9. Назвати фундаментальні принципи для конструювання базуючих з'єднань.
10. Особливості з'єднань оптичних деталей з механічними.
11. Наведіть приклади контактних пар Р1.
12. Наведіть приклади контактних пар Р2.
13. Наведіть приклади контактних пар Р3.
14. Наведіть приклади контактних пар Р4.
15. Наведіть приклади контактних пар Р5.
16. Наведіть приклади кріплення лінз і лінзових блоків.
17. Наведіть приклади кріплення призматичних оптичних деталей.
18. Наведіть приклади кріплення деталей циліндричної форми.
19. Наведіть приклади кріплення деталей сферичної форми.
20. Сили, що діють при з'єднанні оптичних і механічних деталей.
21. Як обмежити вплив децентрувань при кріпленні оптичних деталей?
22. Як розрізняють рівні точності технологічних процесів з'єднання деталей?

РОЗДІЛ 4

КОНСТРУЮВАННЯ ВУЗЛІВ ОСВІТЛЮВАЧІВ

4.1. Конструювання вузла освітлювача в мікроскопах

У мікроскопах освітлювачі віграють дуже важливу роль, оскільки впливають на роздільну здатність мікроскопа. Мікроскоп розглядає дуже дрібну структуру предмета, тому моделлю предмета можуть бути дифракційні ґратки з періодом d . Теорія побудови зображення в мікроскопі базується на теорії дифракції. Здобуття якісного зображення, згідно цієї теорії, може бути досягнуте, коли дотримується принцип Аббе. Суть цього принципу полягає в тому, що зображення відповідає предмету коли в його побудові беруть участь не менше ніж два дифракційні порядки. На рис. 4.1 предмет представлений у вигляді дифракційної ґратки з періодом d . У побудові зображення беруть участь нульовий і перший дифракційний порядки. Із зменшенням періоду перший дифракційний порядок може вийти за межі числової апертури мікрооб'єктива і принцип Аббе не дотримується.

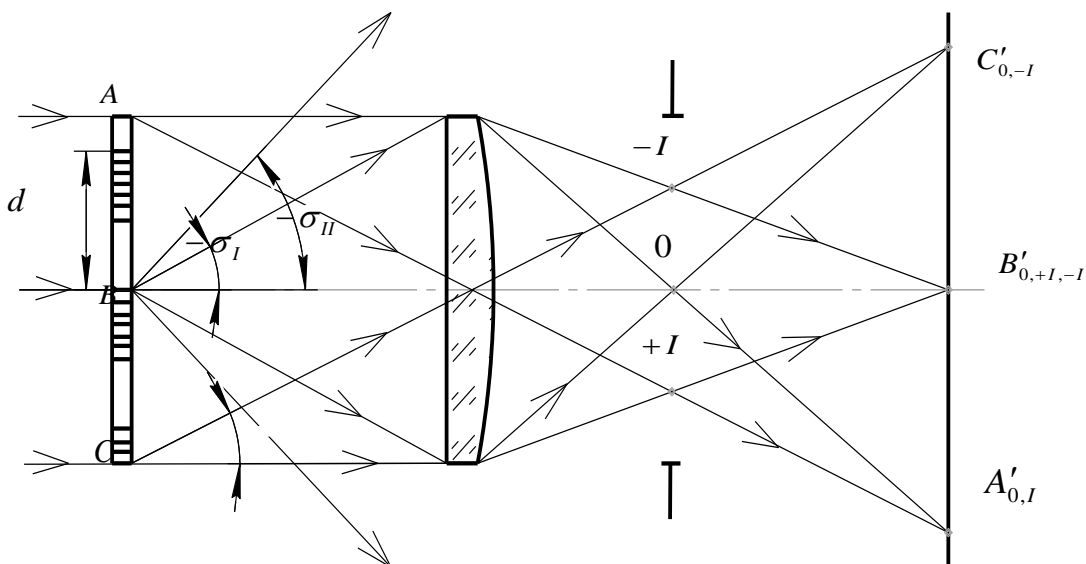


Рис. 4.1. Побудова зображення у мікроскопі

Для того щоб ввести нульовий і перший дифракційний порядки в межі числової апертури мікрооб'єктива предмет за допомогою конденсора освітлюють паралельними пучками нахиленими під кутом до оптичної вісі.

Внаслідок цього нульовий дифракційний порядок пересувається на край апертури, тоді промені першого дифракційного порядку так само потрапляють в межі числової апертури мікрооб'єктива. Числові апертури конденсора і мікрооб'єктива приймаються рівними, тоді роздільна здатність мікроскопа зростає удвічі:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \sigma} = \frac{0,5\lambda}{A}, \quad (4.1)$$

де λ – довжина хвилі;

A – числова апертура;

σ – апертурний кут.

Застосовують освітлювачі світлого і темного полів. Протягом освітлення за методом світлого поля промені від освітлювача пройшовши об'єкт, або дзеркально відбившись від нього, потрапляють в мікрооб'єктив, створюючи позитивний амплітудний контраст. Світлі ділянки в результаті виглядають світлими, а темні – темними. При освітленні за методом темного поля промені від освітлювача безпосередньо в мікрооб'єктив не потрапляють і загальний фон виявляється темним. На темному фоні світлими виглядають ділянки, які краще розсіюють світло або дифузно відбивають. При цьому отримуємо негативний амплітудний контраст. У цьому випадку апертура освітлювача має бути більше апертури мікрооб'єктива.

Типовим прикладом освітлювача світлого поля в світлі, що проходить, є освітлювальна система за схемою Келера на рис. 4.2.

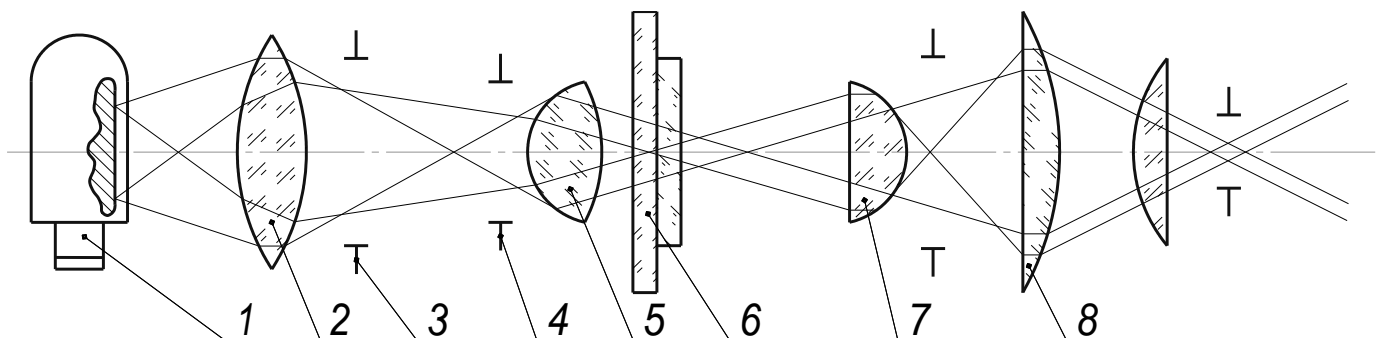


Рис. 4.2. Освітлювальна система Келера:

1 – джерело випромінювання; 2 – колектив; 3 – польова діафрагма; 4 – апертурна діафрагма; 5 – конденсор; 6 – предметне скло; 7 – покрівне скло; 8 – мікрооб'єктив

Змінюючи діаметр польової діафрагми 3, можна регулювати розмір освітленої ділянки не змінюючи рівень освітленості. Змінюючи розмір апертурної діафрагми 4, можна змінювати рівень освітленості, не змінюючи розміру освітленої ділянки.

При великих збільшеннях повітряні проміжки між елементами 5 і 6, 6 і 7 заповнюють імерсійною рідиною з метою вирівнювання показників заломлення відповідних середовищ. Цей прийом дозволяє збільшити числову апертуру мікрооб'єктива і виключити явище повного внутрішнього відбиття. Як рідина може застосовуватися дистильована вода. Тоді на мікрооб'єктивах гравіюється позначення ВІ (водна іммерсія). Коли застосовується кедрове масло, на корпусі гравіюють позначення МІ (масляна іммерсія).

Якщо в мікроскопі використовується освітлювальна система, що працює у відбитому світлі по методу світлого поля, то застосовують два варіанти освітлювальних схем: освітлювальна системи Бека (рис. 4.3 а) або освітлювальна система Наше (рис. 4.3 б).

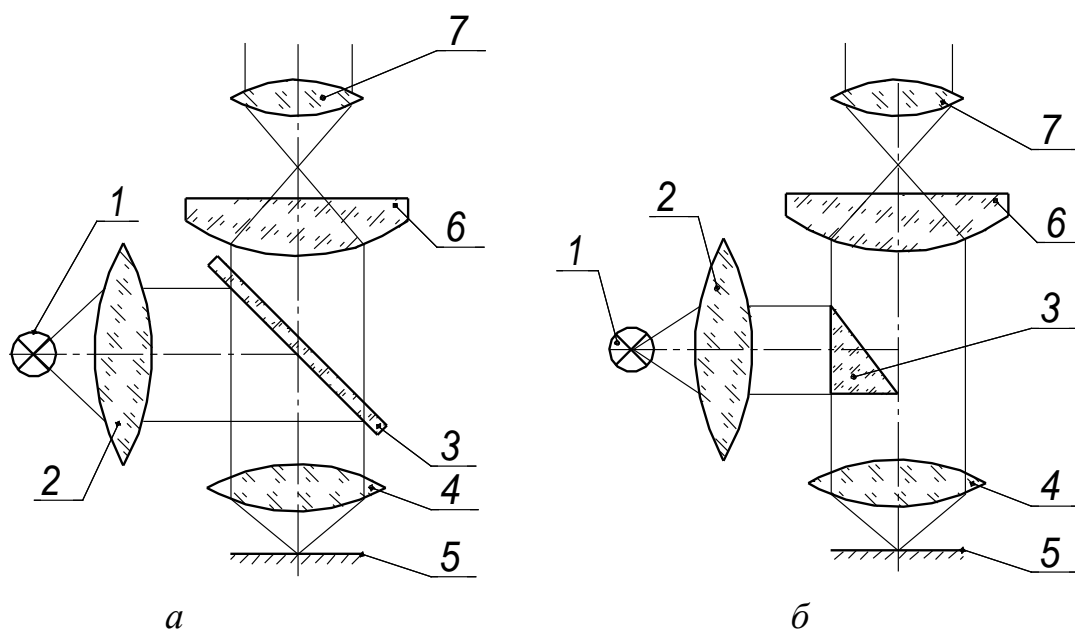


Рис. 4.3. Освітлювальні системи Бека (а) і Наше (б):

- 1 – джерело світла ; 2 – конденсор; 3 – світлоділильна пластина або призма;
4 – мікрооб'єктив; 5 – предмет; 6 – додаткова лінза; 7 – окуляр

Прикладом освітлювача темного поля для роботи у відбитому світлі, є схема з параболоїдним конденсором показана на рис. 4.4.

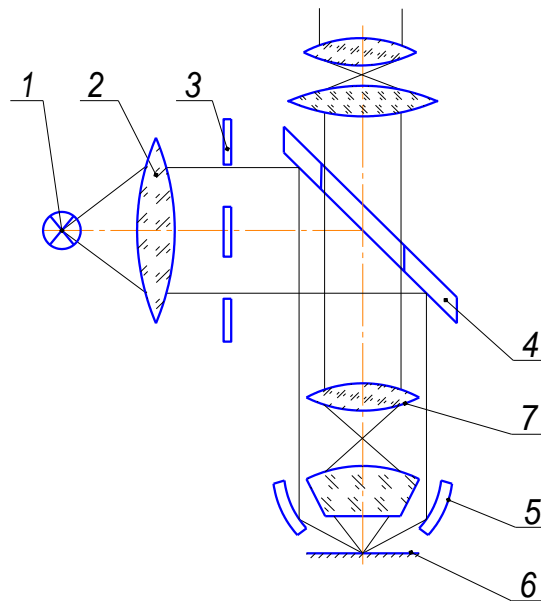


Рис. 4.4. Освітлювач з параболоїдним конденсором:

1 – джерело світла; 2 – конденсор; 3 – діафрагма; 4 – світлодільник; 5 – параболоїдний конденсор; 6 – предмет; 7 – мікрооб’єктив; 8 – додаткова лінза; 9 – окуляр

4.2. Конструювання вузла освітлювача в проекційних приладах

Призначення освітлювальних систем в проекційних приладах полягає в тому, щоб більшу частину світлового потоку джерела направити через об’єктив на екран. За конструкцією освітлювачі такі:

- лінзові;
- дзеркальні;
- дзеркально-лінзові.

Основними характеристиками цих освітлювальних систем є кут охопту і збільшення. У зв’язку з шкідливим впливом аберацій на якість зображення, кути охопту і збільшення оптичної системи освітлювача обмежені. Кут охопту визначає міру використання світлового потоку джерела або ККД освітлювача:

$$\eta = \frac{\Phi}{\Phi_0}, \quad (4.2)$$

де – Φ_0 весь потік від джерела;

Φ – потік, який використовує конденсор.

Для джерела з плоским тілом розжарювання ККД визначається по формулі:

$$\eta = \frac{\sin^2 \sigma_0}{2} . \quad (4.3)$$

Для джерела з точковим тілом розжарювання ККД дорівнює:

$$\eta = \frac{1 - \cos \sigma_0}{2} . \quad (4.4)$$

Підвищити ККД можна застосувавши контрвідбивач для використання зворотнього світла, тоді ККД підвищується на 20 – 70 %.

4.3. Конструювання вузла освітлювача в коліматорних приладах

Коліматорні освітлювачі застосовуються в різних вимірювальних стендах. Основними характеристиками їх є розходження променів і дистанція формування світлового пучка. Схема коліматорного освітлювача показана на рис. 4.5.

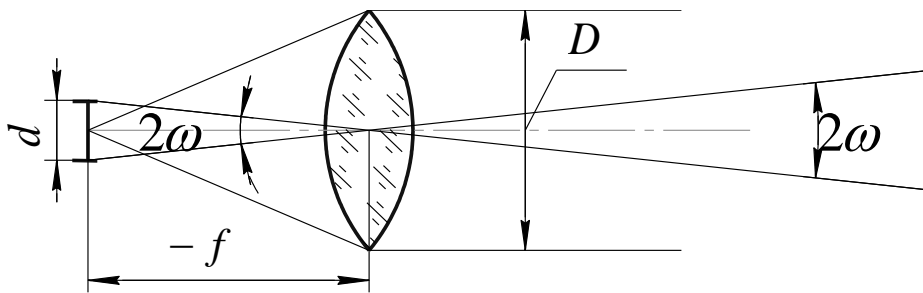


Рис. 4.5. Схема коліматорного освітлювача

Якби джерело було точковим, то кутове розходження променів на виході освітлювача обмежувалося б лише дифракцією і дорівнювало:

$$2\omega_g = \frac{\lambda}{D}, \quad (4.5)$$

де D – діаметр об'єктива коліматора.

Якщо джерело має кінцеві розміри то кутове розходження дорівнює:

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{0,5d}{f'}, \quad (4.6)$$

де d – розмір джерела випромінювання;

f' – фокусна відстань коліматорного об'єктиву.

Оскільки кутове розходження мале то можна вважати, що

$$\omega \approx \frac{0,5d}{f'}. \quad (4.7)$$

Важливою характеристикою освітлювачів цього типу є дистанція формування світлового пучка. Ця дистанція характеризується тим, що до відстані p_0 освітленість на виході об'єктиву коліматора залишається практично незмінною, а за цією відстанню вона зменшується обернено пропорційно до квадрата відстані.

У таких освітлювачах застосовуються лінзові і дзеркально-лінзові об'єктиви. Вибираючи оптичну схему коліматора, необхідно враховувати величину кутової сферичної аберації, яку визначають величиною відносного отвору коліматорного об'єктива $\left(\frac{D}{f}\right)$.

4.4. Основні формули для розрахунку освітлювачів. Особливості конструкцій освітлювачів. Приклади конструкцій

При розрахунках освітлювачів використовують такі формули.

Сила світла джерела:

$$I = \frac{\Phi}{2\pi}, \quad (4.8)$$

де Φ – світловий потік джерела.

Габаритна яскравість джерела світла:

$$L = \frac{\Phi}{4\pi Q}, \quad (4.9)$$

де Q – площа проекції тіла, що світиться, на площину перпендикулярну до оптичної вісі.

Дистанція формування світлового пучка коліматором:

$$P_0 = \frac{D}{d} f', \quad (4.10)$$

де D – світловий діаметр об'єктиву;

d – діаметр діафрагми коліматора;

f' – фокусна відстань об'єктиву.

Освітленість, що створює коліматор на відстані P від нього:

$$E = \tau_a \frac{I_{np}}{P^2}, \quad (4.11)$$

де τ_a – коефіцієнт пропускання атмосфери;

I_{np} – приведена сила світла джерела, що дорівнює:

$$I_{np} = I \tau_{oc} \left(\frac{D}{d} \right)^2, \quad (4.12)$$

де τ_{oc} – коефіцієнт пропускання оптичної системи.

Освітленість, що створюється джерелом в площині зображення:

$$E = \pi L \tau_{oc} \sin^2 \sigma', \quad (4.13)$$

де σ' – апертурний кут в площині зображення.

Інваріант освітлювальної системи коліматора при використанні конденсора в освітлювальній частині відповідно до рис. 4.6 дорівнює:

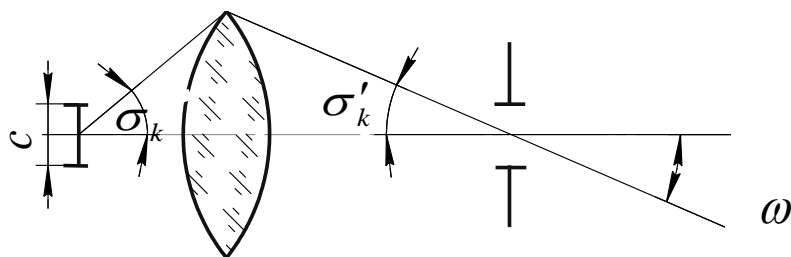


Рис. 4.6. Освітлювальна система коліматора

$$\sin \sigma'_K = \sin \omega, \quad (4.14)$$

$$\sin \sigma'_K = \frac{\sin \sigma_K}{\beta_K}, \quad (4.15)$$

$$\beta_K = \frac{d}{c} \Rightarrow \frac{c \cdot \sin \sigma_K}{d} = \sin \omega, \quad (4.16)$$

де σ_K – кут охопту конденсора.

Інваріант освітлювальної системи мікроскопа

$$\sin \sigma_{\text{кол}} \cdot d = 2yA, \quad (4.17)$$

де $\sigma_{\text{кол}}$ – апертурний кут колективу;

$2y$ – лінійне поле зору мікроскопа (розмір предмету);

A – числова апертура мікрооб'єктива;

d – лінійний розмір випромінювача.

Енергетичні характеристики ламп розжарювання і їх термін служби суттєво залежать від напруги живлення. Ця залежність може бути представлена наступним співвідношенням:

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{U}{U_0} \right)^{m_n}, \quad (4.18)$$

де U і U_0 – дійсна і номінальна напруги живлення ламп розжарювання;

H і H_0 – значення однієї з характеристик ламп;

m_n – показник ступені, що має різне значення для різних характеристик ламп.

Цей показник дорівнює:

- для світлового потоку і сили світла $m_{\Phi, I} = 3,61$;
- для терміну служби ламп $m_{\text{сл}} = -2,03$;
- для енергетичної потужності $m_p = 1,58$.

При використанні лазерних джерел щільність потоків випромінювання в будь якій точці одномодового випромінювання лазера дорівнює:

$$M = \left[\frac{\Phi}{(\pi \omega^2)} \right] \exp \left[-2 \left(\frac{r}{\omega} \right)^2 \right], \quad (4.19)$$

де Φ – повний потік випромінювання лазера;

ω – кутовий розмір перетину пучка лазера, відлічений на рівні $\frac{1}{e^2}$ від максимальної освітленості;

r – відстань від вісі пучка до крапки, в якій визначається щільність.

Енергетична сила світла в певному напрямі при одномодовому режимі роботи дорівнює,:

$$I = 2\Phi\Omega_0 \exp\left[-2\frac{\theta}{\theta_0}\right], \quad (4.20)$$

де Ω_0 – кутовий розмір, в середині якого поширюється випромінювання лазера у величинах тілесного кута;

θ_0 – кутове розходження випромінювання лазера.

$$\Omega_0 = 2\pi(1 - \cos\theta_0), \quad (4.21)$$

де θ – кут, у напрямі якого визначається сила світла лазерного джерела.

Потік випромінювання, що проходить через певний перетин з радіусом r :

$$\Phi_r = \Phi \left\{ 1 - \exp\left[-2\frac{r}{\omega}\right]^2 \right\} \quad (4.22)$$

Конструкція вузлів освітлювачів включає власне джерело, елементи його кріплення, юстування, амортизації, охолодження. Основні вимоги до конструкції вузла джерела наведені нижче.

1. Забезпечення стабільності положення джерела і індикатриси його випромінювання незалежно від зовнішніх чинників, що змінюються.

2. У конструкції вузла джерела мають бути передбачені необхідні пересування з метою його юстування. При цьому необхідно забезпечити такі юстувальні пересування:

- подовжні фокусування;
- поперечні центрування;
- повороти для зміни орієнтації індикатриси випромінювання.

3. У вузлі кріплення джерела випромінювання мають бути передбачені заходи ефективного відведення від нього теплової енергії і ослаблення випромінювання від нагрітих елементів конструкції. При цьому необхідно, щоб у стані теплової рівноваги температура джерела не перевищувала допустимої для нього межі. Для забезпечення нормальних теплових режимів роботи необхідно забезпечити добру теплопровідність патрона і кожуха

випромінювача та інших елементів. Тому для таких деталей потрібен матеріал з високим коефіцієнтом теплопровідності. У конструкції вузла необхідно забезпечити великі площі контакту деталей, що з'єднуються. Чистота обробки поверхонь, що з'єднуються, має бути дуже високою. Для інтенсифікації тепловідводу за рахунок випромінювання в довколишній простір, потрібно збільшити коефіцієнт випромінювання кожуха і інших деталей. Для цього ці деталі покривають темними фарбами або роблять оксидування чорним. Коефіцієнт випромінювання матеріалу має бути $\varepsilon = 0,89 \div 0,93$. У окремих випадках застосовують ребра, що збільшують поверхню випромінювання тепла в зовнішнє середовище. Часто в конструкції здійснюють передачу тепла від джерела до корпусу через спеціальний кронштейн. У тому випадку, коли вказані заходи не ефективні, застосовують примусове охолодження, яке може бути повітряним або водяним. Повітряна вентиляція може бути припливною (вентилятор внизу), витяжною (вентилятор зверху) і комбінованою. Будь який з видів вентиляції передбачає герметизацію приладу.

4. Вузол кріплення джерела випромінювання має бути простим по конструкції, надійний при дії зовнішніх умов, мати мінімальні габарити і висоту.

Приклади конструкцій кріплення джерел випромінювання наступні.

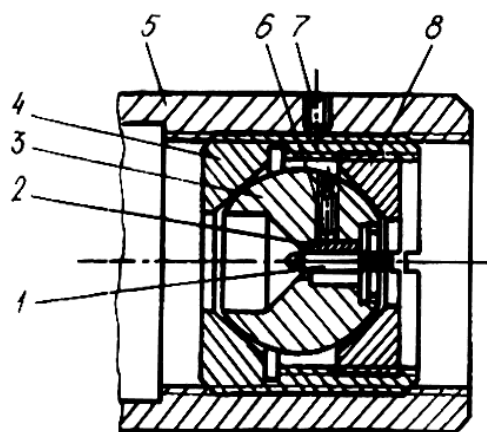


Рис. 4.7. Пристрій для кріплення світлодіода з фокусуванням і регулюванням напрямку випромінювання: 1 – світлодіод; 2 – кільце розрізне; 3 – втулка шарова; 4 – кільце; 5 – корпус; 6 – гвинт; 7 – гвинт; 8 – кільце різьбове

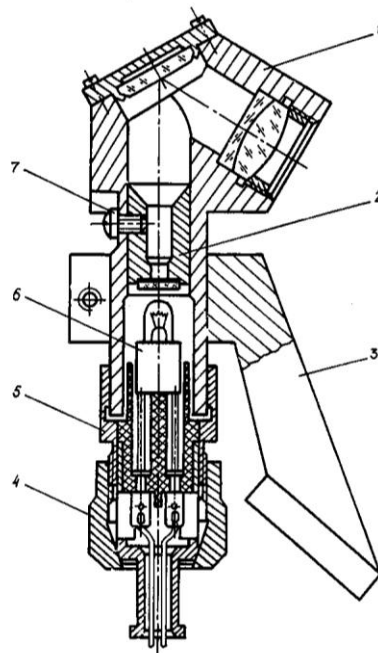


Рис. 4.8. Освітлювач з лампою ОП-3: 1— корпус освітлювача; 2 — втулка; 3 — кронштейн; 4 — гайка; 5 — втулка; 6 — корпус лампи; 7 — гвинт

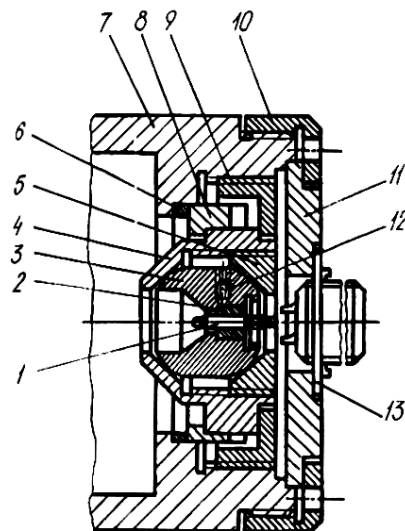


Рис. 4.9. Пристрій для кріплення світлодіода з його центруванням, фокусуванням та регулюванням напрямлення випромінювання: 1 — світлодіод; 2 — оправа; 3 — втулка шарова; 4 — оправа; 5, 9 — кільця різьбові; 6 — кільце підрізне; 7 — корпус; 8 — кільце ексцентричне; 10 — гайка; 11 — втулка; 12 — гвинт; 13 — живлення

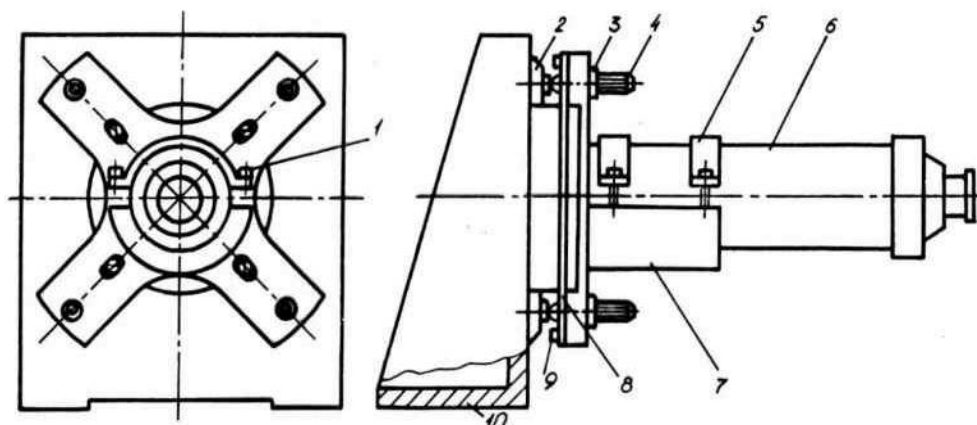


Рис. 4.10. Вузол кріплення лазера ЛГ-55: 1 – гвинт; 2 – палець упорний; 3 – втулка; 4 – гвинт; 5 – гвинт юстувальний; 6 – лазер ЛГ-55; 7 – обойма; 8 – пружина плоска; 9 – гвинт; 10 – кронштейн

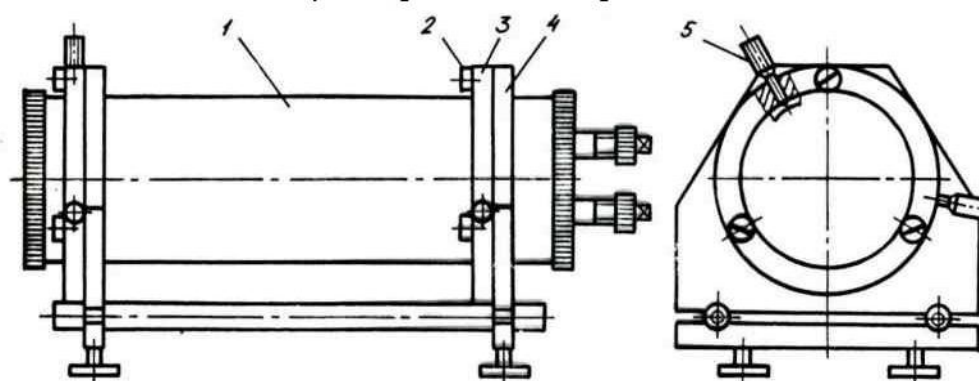


Рис. 4.11. Вузол кріплення лазера ЛГ-44: 1 – лазер ЛГ-44; 2 – гвинт; 3 – кільце фіксувальне; 4 – кронштейн; 5 – гвинт юстувальний

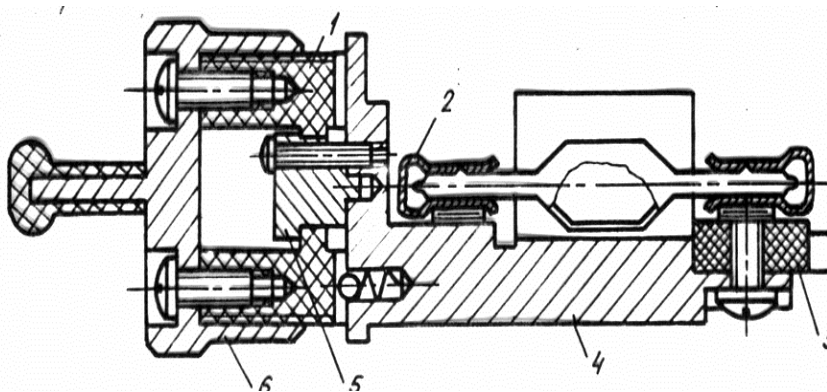


Рис. 4.12. Вузол кріплення галогенної лампи КГМ-6,6: 1 – втулка; 2 – тримач пластинчатий; 3 – ізолююча пластина; 4 – основа; 5 – прижим; 6 – кільце

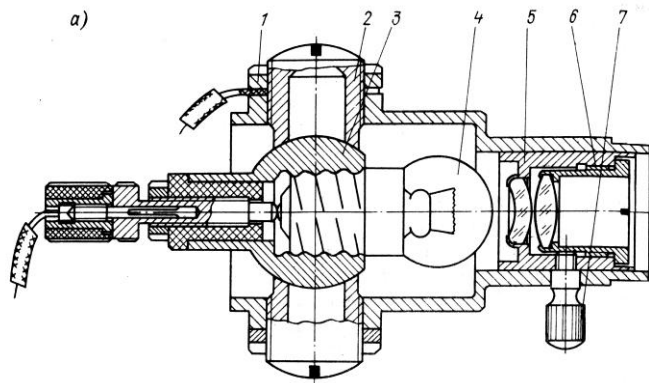


Рис. 4.13. Приладовий освітлювач: 1 – корпус; 2 – дві різьбові опори; 3 – сферичний шарнір; 4 – лампа; 5 – оправа; 6 – втулка; 7 – поводок

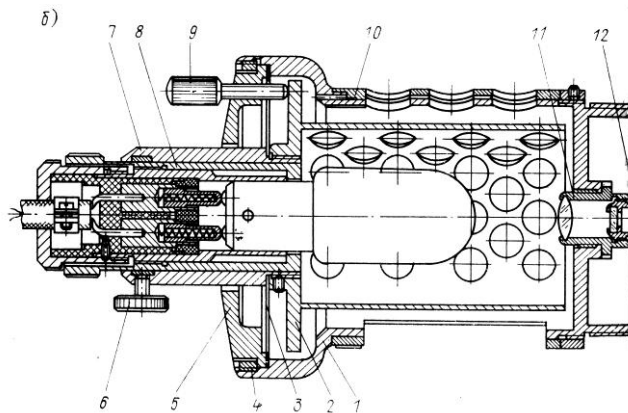


Рис. 4.14. Конструкція освітлювача з лампою PH8-20: 1 – корпус; 2 – шайба; 3 – мембрана; 4 – різьбове кільце; 5 – кришка; 6 – гвинт; 7 – оправа; 8 – втулка; 9 – юстувальний гвинт; 10 – кожух; 11 – оправа лінзи; 12 – втулка

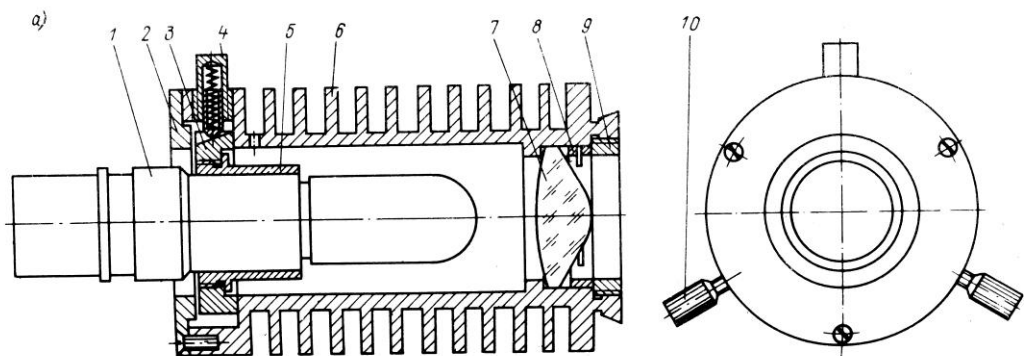


Рис. 4.15. Освітлювач з лампою PH8-20: 1 – лампа; 2 – фланець; 3 – шайба; 4 – гвинт; 5 – втулка; 6 – корпус; 7 – конденсор; 8 – пружне кільце; 9 – різьбове кільце; 10 – юстувальний гвинт

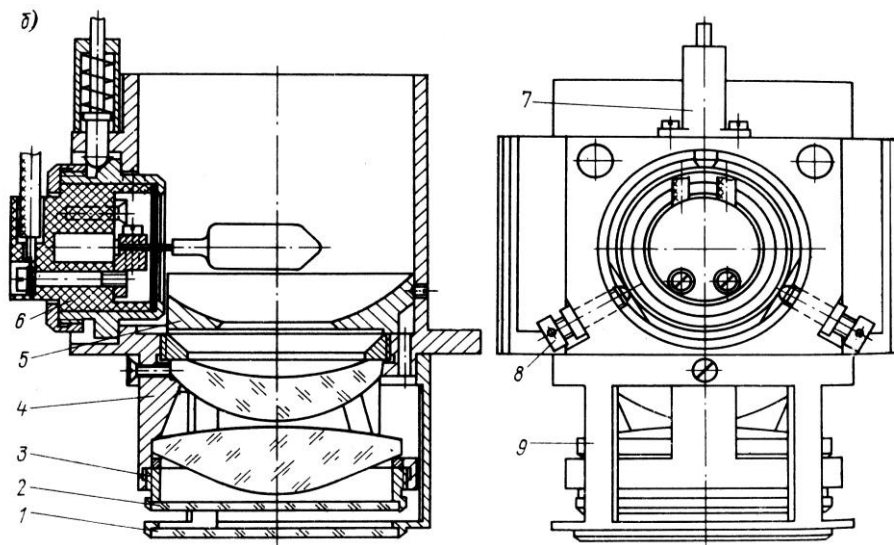


Рис. 4.16. Освітлювач проекційної системи з лампою КГМ9-70: 1 – світлофільтр; 2 – світлофільтр; 3 – різьбове кільце; 4 – корпус; 5 – діафрагма; 6 – патрон з лампою; 7 – пружний упор; 8 – винт; 9 – оправа світлофільтрів

Контрольні питання

1. У чому полягає принцип Аббе?
2. Типи освітлювачів у мікроскопах.
3. Властивості освітлювальної системи Келера.
4. Призначення імерсії в освітлювальній системі.
5. Як визначається ККД освітлювача проекційної системи?
6. Що таке дистанція формування світлового пучка?
7. Як енергетичні характеристики ламп розжарювання залежать від температури?
8. Від чого залежить освітленість в площині зображення?
9. Особливості конструкції вузла освітлювача.
10. Засоби охолодження вузла освітлювача.
11. Характеристики конденсорних систем.

РОЗДІЛ 5

КОНСТРУЮВАННЯ ВУЗЛІВ ОБ'ЄКТИВІВ І ОКУЛЯРІВ

5.1. Основні характеристики і класифікація конструкцій об'єктивів.

Вимоги до точності позиціювання об'єктивів

Основними характеристиками об'єктивів є.

Геометричні параметри об'єктивів:

- діаметр вхідної зіниці $D_{\text{вх}}$;
- фокусна відстань об'єктива $f'_{\text{об}}$;
- відносний отвір D/f' ;
- кут поля зору 2ω ;
- довжина оптичної системи L ;
- передній і задній фокальний відрізки;
- числова апертура A ;
- збільшення об'єктива β ;
- діафрагмове число $f'_{\text{об}} / D$.

Енергетичні характеристики об'єктива:

- інтегральний коефіцієнт пропускання τ ;
- спектральний коефіцієнт пропускання τ_{λ} ;
- геометрична світлосила об'єктива $\left(D/f'\right)^2$;
- фізична світлосила об'єктива $\tau \cdot \left(D/f'\right)^2$;
- коефіцієнт розсіювання об'єктива ρ .

Характеристики зображення об'єктива:

- діаметр кола розсіювання об'єктива;
- гранична роздільна здатність $\nu = \frac{1}{\phi_{\text{к.р.}}}$;
- оптична передавальна функція(ОПФ).

Масогабаритні характеристики:

- маса об'єктива;
- надійність об'єктива;
- матеріали.

Класифікуються об'єктиви по різних ознаках. Класифікація по типах розрізняє такі об'єктиви:

- лінзові;
- дзеркальні;
- дзеркально-лінзові.

Переваги дзеркальних об'єктивів такі:

- можливість отримання високої світлосили;
- відсутність хроматизму у дзеркал;
- високий коефіцієнт пропускання ;
- компактність конструкції.

Недоліки дзеркальних об'єктивів:

- малі кутові поля у зв'язку з наявністю аберації кома;
- в більшості випадків центральне екранування;
- складність юстування дзеркальних об'єктивів, обумовлена високими вимогами до центрування.

Дзеркально-лінзові об'єктиви використовують лінзові компоненти для корекції аберацій. Ці компоненти прагнуть розташовувати у вузьких пучках променів.

Класифікація за призначенням включає такі об'єктиви:

- об'єктиви телескопічних систем (мають малі кутові поля);
- об'єктиви фотографічних і проекційних приладів ;
- ширококутні об'єктиви ;
- об'єктиви мікроскопів із збільшенням $3 \div 90 \times$ (ці об'єктиви розраховуються для довжини тубуса 160мм і товщини покрівного скла $d = 0,17$ мм.);
- спеціальні об'єктиви для інфрачервоної (ІЧ) області спектру; спеціальні об'єктиви працюють в трьох спектральних діапазонах:
- ближня ІЧ область $\Delta\lambda = 0,76 \div 3,0$ мкм;

- середня ІЧ область $\Delta\lambda = 3 \div 5$ мкм;
- далека ІЧ область $\Delta\lambda = 8 \div 14$ мкм.

У середньому і далекому ІЧ діапазонах необхідно застосовувати спеціальні матеріали. До таких матеріалів відносяться: KRS5,6 (до 25мкм); синтетичний сапфір Al_2O_3 (до 5мкм); германій ГМ0 (до 15мкм); Іртран 1 MGF (до 10 мкм); Іртран 2 ZNS (до 15 мкм); сітал СО-115м, церодур, карбід кремнію.

За особливостями конструкції розрізняють такі об'єктиви.

1. Об'єктиви «насіпної» конструкції. У цих об'єктивах лінзи або лінзи в оправках заздалегідь юстують, а потім встановлюють в корпус з мінімальним зазором без юстування.
2. Об'єктиви з оправками, що згвинчуються. У цих об'єктивах лінзи і оправки виготовляють по калібрах з мінімальним зазором і встановлюють в корпус без юстування.
3. Об'єктиви одиничних приладів. У цих об'єктивах деталі підганяють в процесі збірки, що супроводжується юстуванням.

5.2. Похибки конструкції об'єктивів

Похибка базування об'єктива пов'язана з подовжнім розташуванням об'єктива в оптичній схемі приладу. Зв'язок між похибкою базування Δz_o об'єктива і зсувом площини зображення визначається співвідношенням [10]:

$$\Delta l = \Delta z_o [1 - (\beta_o - \Delta\beta)\beta_o], \quad (5.1)$$

де Δz_o – похибка базування об'єктиву;

β_o – розрахункове значення збільшення;

$\Delta\beta$ – відхилення збільшення від розрахункової величини;

Δl – зсув площини зображення.

Розкривши дужки, отримаємо остаточне рівняння для зрушення площини зображення:

$$\Delta l = \Delta z_o (1 - \beta_o^2 + \beta_o \cdot \Delta\beta). \quad (5.2)$$

Розглянемо деякі випадки для типових оптичних систем.

1. Телескопічна система:

$$\beta_0 \leq 1; \Delta l \approx \Delta z_o. \quad (5.3)$$

2. Оптична система мікроскопа:

$$\beta_0 \geq 1; \Delta l = -\beta_0^2 \Delta z_o. \quad (5.4)$$

Мікрооб'єктиви потрібно встановлювати особливо точно, оскільки при похибці їх установки площина зображення рухається в протилежну сторону пропорційно β^2 .

3. Обертаюча система характеризується наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \beta_0 &= \pm 1 \\ \Delta l &= \beta_0 \cdot \Delta \beta \cdot \Delta z_o = -\beta_o \frac{f'}{z_o^2} \Delta z_o^2 \\ &= -\beta_0^2 \frac{\Delta z_o^2}{z_0} = -\frac{\Delta z_o^2}{z_0} \\ \beta &= -1 \Rightarrow z_0 = -f' \\ \beta &= 1 \Rightarrow z_0 = f' \end{aligned}$$

Тоді отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \Delta l &= +\frac{1}{f'} \Delta z_o^2 \\ \Delta l &= -\frac{1}{f'} \Delta z_o^2 \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

До точності позиціювання обертаючих систем жорстких вимог не треба, оскільки зрушення площини зображення в них є величиною другого порядку кривизни.

4. У системі коліматора допустимий зсув об'єктиву визначається допустимою діоптрійною мірою сходження променів на виході об'єктиву і дорівнює

$$\Delta z_o = -\frac{f'^2 A_{don}}{1000}, \quad (5.6)$$

де A_{don} – допустима збіжність пучків на виході об'єктиву коліматора.

Можна отримати узагальнену формулу, що зв'яже зрушення площини зображення з похибкою базування об'єктиву вздовж оптичної вісі Δz_o :

$$\Delta l = \left(1 - \frac{f'^2}{z_0 \cdot z}\right) \Delta z_o = \left(1 - \frac{f'^2}{z_0(z_0 - \Delta z_o)}\right) \Delta z_o = \left(1 - \frac{f'^2}{z_0^2 \left(1 - \frac{\Delta z_o}{z_0}\right)}\right) \Delta z_o =$$

$$= \left(1 - \frac{f'^2}{z_0^2} \left(1 + \frac{\Delta z_o}{z_0}\right)\right) \Delta z_o = \left(1 - \beta_0^2 - \beta_0^2 \frac{\Delta z_o}{\Delta z_0}\right) \Delta z_o = (1 - \beta_1^2) \Delta z_o - \frac{\beta_0^3 \Delta z_o^2}{f'}. \quad (5.7)$$

Під час виготовлення об'єктива мають місце похибки конструктивних параметрів, що призводить до розфокусування, паралаксу у вимірювальних приладах, похибки масштабу зображення і непаралельності вісей в біноклярних приладах. Визначимо вплив похибок конструктивних параметрів лінзи на відхилення фокусної відстані Δf . Для цього скористаємося формулою для оптичної сили лінзи:

$$\Phi = \frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{d(n-1)^2}{n \cdot r_1 \cdot r_2}. \quad (5.8)$$

Для оцінки впливу похибок конструктивних параметрів на відхилення фокусної відстані Δf потрібно диференціювати співвідношення (5.8) по конструктивним параметрам, що до нього входять. Взявши похідні, отримаємо:

$$\Delta f'_{\Delta n} = -f'^2 \Delta \Phi_{\Delta n} = -f'^2 \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{d(n^2-1)}{n^2 \cdot r_1 \cdot r_2} \right] \Delta n \approx \left(\frac{f'}{n-1} \right) \Delta n; \quad (5.9)$$

$$\Delta f'_{\Delta r_1} = -f'^2 \Delta \Phi_{\Delta r_1} = -f'^2 \left[\frac{(n-1)}{r_1^2} + \frac{d(n^2-1)^2}{n \cdot r_1^2 \cdot r_2^2} \right] \Delta r_1 \approx \frac{f'^2(n-1)}{r_1^2} \Delta r_1; \quad (5.10)$$

$$\Delta f'_{\Delta r_2} = -f'^2 \Delta \Phi_{\Delta r_2} = -f'^2 \left[\frac{(n-1)}{r_2^2} + \frac{d(n^2-1)^2}{n \cdot r_1^2 \cdot r_2^2} \right] \Delta r_2 = -\frac{f'^2(n-1)}{r_2^2} \Delta r_2; \quad (5.11)$$

$$\Delta f'_{\Delta d} = -f'^2 \Delta \Phi_{\Delta d} = \frac{-f'^2(n-1)}{n \cdot r_1 \cdot r_2} \Delta d. \quad (5.12)$$

На етапі конструювання всі похибки відносять до випадкових. Тому сумарне відхилення фокусної відстані визначиться співвідношенням:

$$\Delta f'_{\Sigma} = \sqrt{\left(\frac{f'}{n-1}\right)^2 \delta n^2 + \left(\frac{f'^2(n-1)}{r_1^2}\right)^2 \delta r_1^2 + \left(\frac{f'^2(n-1)}{r_2^2}\right)^2 \delta r_2^2 + \left(\frac{f'^2(n-1)^2}{n \cdot r_1 \cdot r_2}\right)^2 \delta d^2}. \quad (5.13)$$

Для одиночного дзеркала із зовнішнім віддзеркаленням фокусна відстань дорівнює:

$$f' = \frac{r}{2}, \quad (5.14)$$

де r – радіус сферичної поверхні.

Відхилення фокусної відстані дорівнює:

$$\Delta f_{\Delta r} = \frac{1}{2} \Delta r \cdot \frac{r}{r} = f' \frac{\Delta r}{r}. \quad (5.15)$$

У разі використання склеювання лінз, приймають $d \rightarrow 0$ і використовують умову ахроматизації:

$$\nu_1 f'_1 = -\nu_2 f'_2, \quad (5.16)$$

де f'_1 і f'_2 – фокусні відстані першого і другого компонентів склеювання;

ν_1 і ν_2 – коефіцієнти дисперсії матеріалів.

Відхилення фокусної відстані склеєного об'єктива може бути розраховане по формулі:

$$\Delta f'_{скл} = \sqrt{\left(\frac{f'^2_{скл} \cdot \Phi_1}{n_1 - 1}\right)^2 \delta n_1^2 + \left(\frac{f'^2_{скл} \cdot \Phi_1 \nu_2}{(n_2 - 1) \nu_1}\right)^2 \delta n_2^2 + \left(\frac{f'^2_{скл}(n_1 - 1)}{r_1^2}\right)^2 \delta r_1^2 + \left(\frac{f'^2_{скл}(n_1 - 1)}{r_4^2}\right)^2 \delta r_4^2} \quad (5.17)$$

При зміні температури якість зображення може погіршуватися унаслідок розфокусування оптичної системи. Розглянемо об'єктив, який будує зображення на фотоприймачі встановленому в його фокальній площині

На рис. 5.1 об'єктив 1 складається з двох склеєних лінз закріплених в корпусі 2, в якому встановлений фотоприймач 3. Зміна температури приводить до змін радіусів кривизни, показників заломлення і товщини лінз і, як слідство, до розфокусування. Унаслідок подовження корпусу змінюється також відстань між об'єктивом і фотоприймачем.

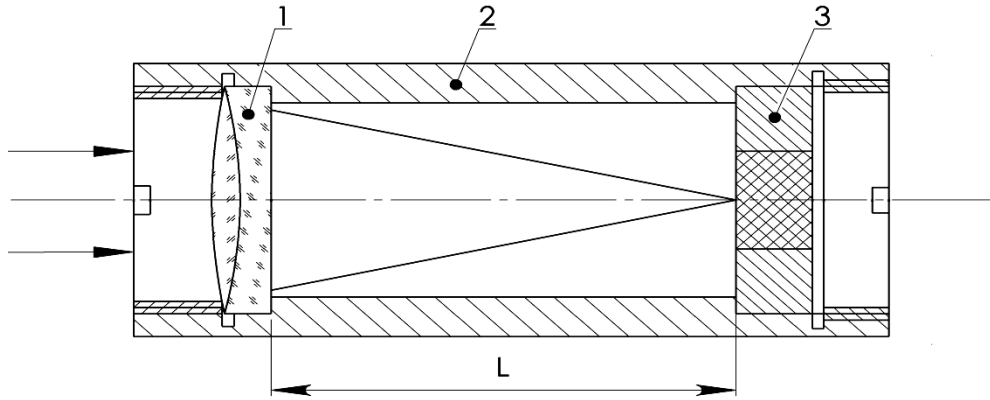


Рис. 5.1. Побудова зображення на фотоприймачі:
1 – об’єктив; 2 – корпус; 3 – фотоприймач

Для тонкої лінзи залежність відхилення фокусу від зміни температури може бути отримана на основі аналізу формули для оптичної сили такої лінзи:

$$\Phi = \frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (5.18)$$

Взявши похідну від співвідношення (5.18) по зміні температури, отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta f'_{\Delta t} &= -f'^2 \Delta \Phi_{\Delta t} = -f'^2 \left[\frac{\Delta n_{\Delta t} (n-1)}{(n-1)} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - (n-1) \left(\frac{\Delta r_{1\Delta t}}{r_1^2} - \frac{\Delta r_{2\Delta t}}{r_2^2} \right) \right] = \\ &= -f'^2 \Phi \Delta t \left(\frac{\beta_{\lambda}}{(n-1)} - \alpha \right). \end{aligned} \quad (5.19)$$

У (5.19) $\Delta r_{1,2\Delta t} = r_{1,2} \cdot \alpha \cdot \Delta t$, де α – лінійний температурний коефіцієнт розширення матеріалу; β_{λ} – коефіцієнт збільшення показника заломлення при зміні температури для довжини хвилі λ .

Термооптична стала скла визначається співвідношенням:

$$\left(\frac{\beta_{\lambda}}{n-1} - \alpha \right) = V_t. \quad (5.20)$$

Підставивши V_t в (5.19) отримаємо:

$$\Delta f'_{\Delta t} = -f'^2 \Phi V_t \Delta t = -f' V_t \Delta t. \quad (5.21)$$

Співвідношення (5.21) показує як залежить відхилення фокусної відстані лінзи від коливань температури. V_t – довідкова величина і дається як одна з характеристик оптичного скла.

Для того щоб компенсувати відхилення фокусної відстані при коливаннях температури в автоматичному режимі, застосовують термокомпенсатори. Для компенсації терморозфокусування застосовують два кільця термокомпенсатора з α близьким до α скла. Як матеріал кілець застосовують сталь, титан, інвар, алюміній, латунь. Для визначення лінійних розмірів кілець використовується умова відсутності розфокусування. При цьому враховується, що для склеєного об'єктиву, відхилення фокусної відстані дорівнює:

$$\Delta f'_{\text{скл}\Delta t} = -f'^2_{\text{скл}} (\Phi_1 V_{t_1} + \Phi_2 V_{t_2}) \Delta t, \quad (5.22)$$

де Φ_1 і Φ_2 – оптичні сили першого і другого елементів склеювання.

5.3. Розрахунки термокомпенсаторів при конструюванні об'єктивів

На рис. 5.2 приведена конструкція термокомпенсатора розфокусування. У конструкцію входить об'єктив 1, два циліндрові кільця 2 і 4, встановлені між об'єктивом і фотоприймачем 5, корпус 3, пружинне кільце 6.

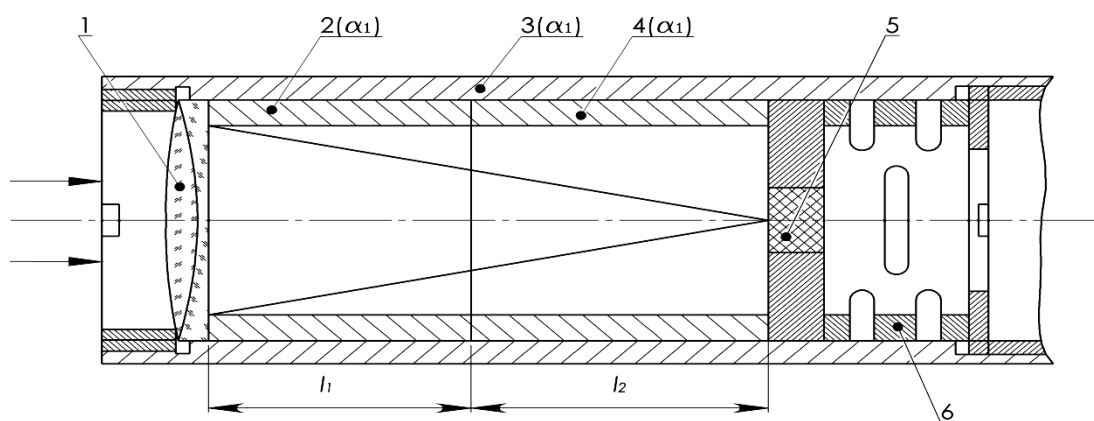


Рис. 5.2. Термокомпенсатор розфокусування:

1 – об'єктив; 2, 4 – два циліндрові кільця термокомпенсатора; 3 – корпус;

5 – фотоприймач; 6 – пружинне кільце

Умова відсутності розфокусування має вигляд:

$$\Delta f'_{\Delta t} = \Delta l_{1\Delta t} + \Delta l_{2\Delta t}; \text{ де } \Delta l_{1,2} = \alpha_{1,2} \cdot l_{1,2} \cdot \Delta t. \quad (5.23)$$

Тоді отримаємо:

$$-f'^2 \cdot (\Phi_1 \cdot V_{1t} + \Phi_2 \cdot V_{2t}) = l_1 \cdot \alpha_1 + l_2 \cdot \alpha_2. \quad (5.24)$$

Оскільки $l_1 + l_2 = f'_s$, то вибравши матеріал з якого виготовлятимуться кільця термокомпенсатора, тобто вибравши α_1 і α_2 , можна вирішити рівняння (5.24) відносно невідомих l_1 і l_2 :

$$l_1 = \frac{[-f'^2(\Phi_1 V_{1t} + \Phi_2 V_{2t}) - f'_{скл} \alpha_2]}{\alpha_1 - \alpha_2}, \quad (5.25)$$

$$l_2 = f'_{скл} - l_1. \quad (5.26)$$

У тому випадку, коли необхідно пересувати фотоприймач вліво і вправо відносно номінального положення, застосовуються термокомпенсатори з трьох кілець (рис. 5.3). У разі трьох кілець термокомпенсатора, умова відсутності розфокусування набирає вигляду:

$$\Delta f'_{скл\Delta t} = (L_K \alpha_K - l_1 \alpha_1 + l_2 \alpha_2 + l_3 \alpha_3) \Delta t, \quad (5.27)$$

де L_K – довжина корпусу.

На рис. 5.3 показані набори кілець 1 – 3 з різними коефіцієнтами лінійного розширення, різьбове кільце 4, пружинне кільце 5.

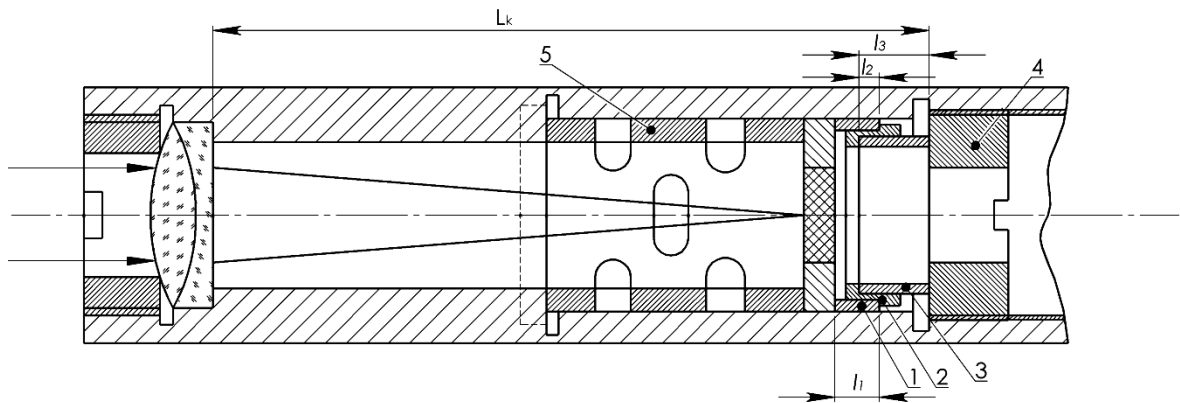


Рис. 5.3. Термокомпенсатор з трьох кілець:

1, 3 – кільця з різними коефіцієнтами лінійного розширення; 4 – різьбове кільце;
5 – пружинне кільце

У тому випадку, коли відхилення фокусної відстані є значними, (це має місце в довгофокусних системах і при великих коливаннях температур),

можуть бути застосовані рідинні компенсатори. Для визначення пересування поршня при зміні температури, застосовується співвідношення:

$$l_1 = \Delta V_{\Delta t} \cdot A_0^{-1} = [V_0(\beta - 3\alpha)\Delta t] \cdot [A_0(1 + 2\alpha\Delta t)]^{-1}, \quad (5.28)$$

де $\Delta V_{\Delta t}$ – зміна об'єму рідини при зміні температури;

A_0 – номінальний поперечний перетин поршня;

V_0 – номінальний об'єм рідини;

β – коефіцієнт об'ємного розширення рідини;

α – коефіцієнт температурного розширення матеріала поршня.

Відношення довжин важелів механізму для пересування поршня дорівнює:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{V_0(\beta - 3\alpha)\Delta t \cdot K}{A_0(t + 2\alpha\Delta t)\Delta S}, \quad (5.29)$$

де K – коефіцієнт впливу пересування лінзи на розфокусування об'єктиву;

ΔS – величина зрушення площини зображення при зміні температури.

Термокомпенсатори застосовуються для компенсації передавлення лінз в оправках при зміні температури. Крім того, вони дозволяють виключати появу зазорів в з'єднанні лінз в оправках. Розрахунок таких термокомпенсаторів виконується з використанням співвідношення:

$$2L_K\alpha_K\Delta t = D_o\alpha_o\Delta t - D_l\alpha_l\Delta t, \quad (5.30)$$

де L_K, D_o, D_l – довжина компенсатора, діаметр оправки і діаметр лінзи;

$\alpha_K, \alpha_o, \alpha_l$ – відповідні лінійні температурні коефіцієнти розширення.

Якщо вважати, що діаметр оправки $D_o = D_l + 2L_K$, виходячи із співвідношення (5.30), можна розрахувати довжину компенсатора:

$$L_K = \frac{D_l(\alpha_o - \alpha_l)}{2(\alpha_K - \alpha_o)}. \quad (5.31)$$

Як матеріал термокомпенсатора в таких конструкціях застосовують:

- органічне скло СОЛ ($\alpha = 9 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$);
- вінілові пластмаси ВП ($\alpha = 7 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$).

Для фіксації термокомпенсаторів застосовуються герметики. У великогабаритних лінзах, кількість компенсаторів може сягати 15-16. Допустима величина терморозфокусувань визначається рядом чинників, серед яких такі.

1. Дифракційна глибина різкості об'єктиву.
2. Допустимий подовжній паралакс (неспівпадання площини сітки і площини зображення).
3. Геометрична глибина різкості (для проекційних об'єктивів).
4. Глибина акомодативної різкості для окуляра.

Допустиме відхилення фокусної відстані при обмеженні дифракційною глибиною різкості визначається з співвідношення:

$$\Delta z = \pm \frac{0,2}{\sigma'_A{}^2} \text{ мкм}, \quad (5.32)$$

де σ'_A – задній апертурний кут фокусуючої системи.

При обмеженні паралаксом допустима величина Δz дорівнює:

– для телескопічної системи

$$\Delta z = \frac{f_{ок}'^2 \cdot \theta'_{дон} \cdot \Gamma}{3440 \cdot t_{max}}, \quad (5.33)$$

де $\theta_{дон}$ – допустимий кутовий паралакс в площині предмета;

Γ – збільшення телескопічної системи;

t_{max} – максимально можливе пересування ока(поперечне) в межах вихідної зіниці;

– для системи мікроскопа

$$\Delta z = \frac{f_{ок}' \cdot P_{дон} \cdot \beta}{t_{max}}, \quad (5.34)$$

де $P_{дон}$ – допустимий лінійний паралакс;

β – збільшення мікрооб'єктива.

– для проекційних систем

$$\Delta z = \pm f'^2 \psi L_{min} [(P - 2f') D_{ex}]^{-1} \quad (5.35)$$

де ψ – кутова роздільна здатність ока в радіанах;

L_{\min} – мінімальна відстань від екрана до спостерігача;

P – відстань від проекційного об'єктива до екрана;

D_{ex} – діаметр вхідної зіниці об'єктива.

– при обмеженні глибиною акомодативної різкості для окуляра

$$\Delta z = \frac{250}{\Gamma_{\text{ок}}^2}, \quad (5.36)$$

де $\Gamma_{\text{ок}}$ – збільшення окуляра.

5.4. Класифікація та основні типи систем автофокусування об'єктивів

Загальна схема пристроїв автофокусування об'єктивів складаються з елементів показаних на рис. 5.4 і діляться на дві групи. Системи прямого управління, коли датчик різкості 3 розташований поза основним ходом променів, що йдуть від об'єкту 1 через фокусуючий об'єктив 2, який пересувається двигуном 5 по сигналу від елементу, що управляє 4.

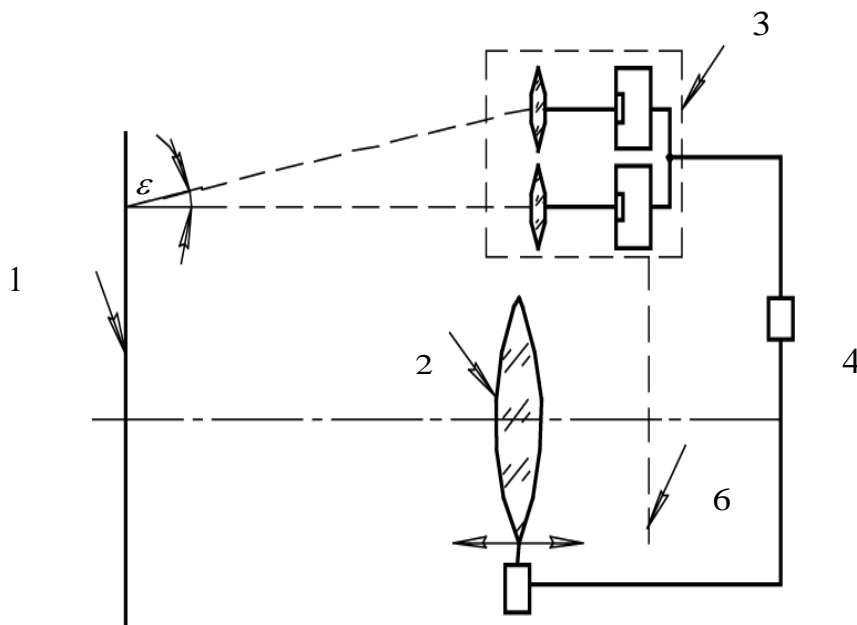


Рис. 5.4. Пристрій автоматичного фокусування об'єктива:

1 – об'єкт, що зображається; 2 – об'єктив; 3 – датчик різкості ; 4 – елемент, що управляє;
5 – двигун для фокусування об'єктива; 6 – площина зображення

Схема системи із зворотнім зв'язком або замкнутої системи управління показана на рис. 5.5. При цьому датчик різкості розташований вздовж вісі системи.

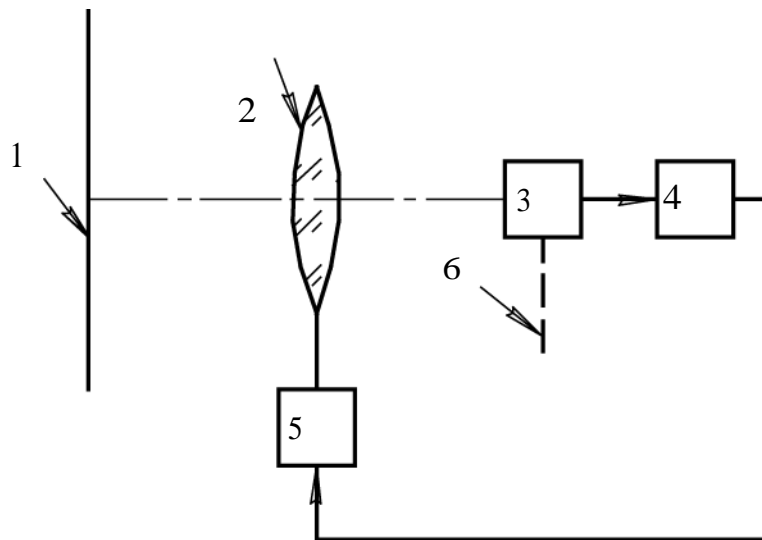


Рис. 5.5. Система з зворотнім зв'язком:

1 – об'єкт, що зображається ; 2 – об'єктив; 3 – датчик різкості; 4 – елемент, що управляє;
5 – двигун для фокусування об'єктива; 6 – площина зображення

Датчик різкості в другій схемі оцінює відсутність різкості зображення в двох площинах, рівновіддалених від площини найкращої установки. Раніше такі схеми, із застосуванням візуального контролю, називалися схемами з Дапай растром. Дапай растр був у вигляді скляного кубика на торцевих поверхнях якого були зроблені матовані смужки. Розташування смужок на протилежних поверхнях було зсунуто на половину періода. Зображення предмета, що будувалось на цих поверхнях, було однаково розфокусованим в тому випадку, коли площа найкращого фокусування розташовувалась посередині скляного кубіка. Спостерігач фіксував цей момент і робив фотографування.

Системи автоматичного фокусування (САФ) можуть бути активного і пасивного типу. Прикладом системи активного типу є система, що працює за принципом локатора, який посилає до об'єкту ІЧ промені від світлодіода або міні-лампочки і сприймає відбитий сигнал, міряючи паралактичний кут ε (див. рис. 5.6). Такі системи використовують у фотоапаратурі Canon, Minolta.

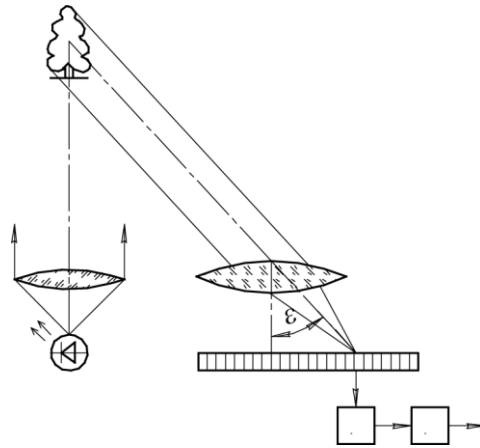


Рис. 5.6. Система автофокусування активного типу

Системи пасивного типу можуть будуватися на кореляційному принципі обробки сигналу. Така система використовується у фотоапаратурі Wisitronic, Honeywell і її схема показана на рис. 5.7.

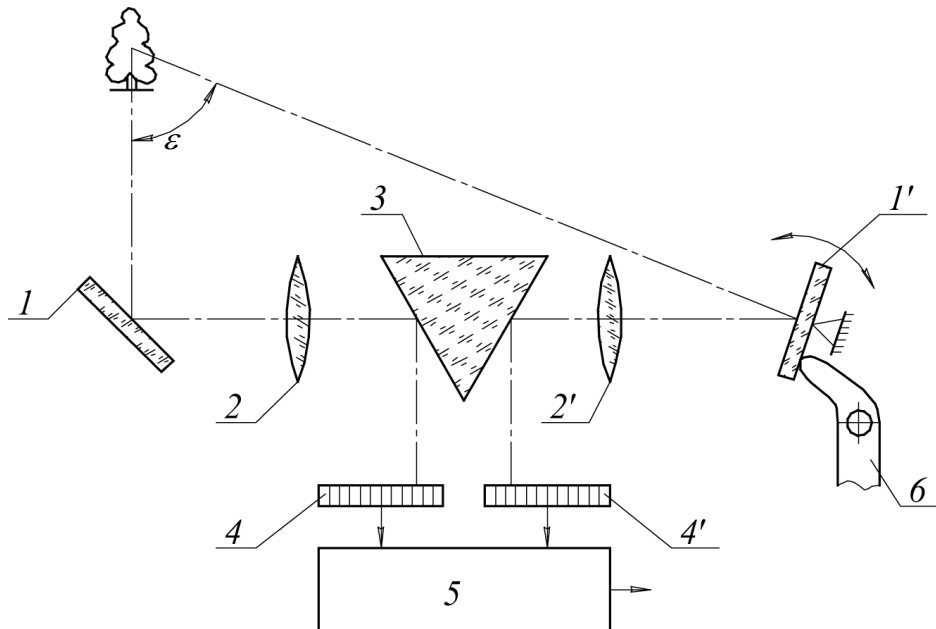


Рис. 5.7. Система автофокусування пасивного типу:

- 1 – нерухоме дзеркало; 1' – поворотне дзеркало; 2, 2' – фокусуючі об'єктиви; 3 – призма;
4, 4' – прилад з зарядовим зв'язком; 5 – пристрій управління; 6 – двигун

Під час повороту дзеркала 1' знімаються струми з приладів з зарядовим зв'язком (ПЗЗ). Якщо, наприклад, таких елементів п'ять, то відповідно будуть зняті струми I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 і $I'_1, I'_2, I'_3, I'_4, I'_5$. Кореляційний струм визначається по формулі: $i_k = I_1 I'_1 + I_2 I'_2 + \dots + I_n I'_n$

Передбачимо, що темновому струму відповідає одна одиниця, а зображенню три одиниці. Передбачимо в першому випадку зображення на 1-ій і 2-ій лінійках проектується на другий і четвертий елементи тоді кореляційний струм дорівнює: $I_2 = 3$
 $I'_4 = 3$ $i_k = 9$. У другому випадку зображення в обох лінійках проектується на третій елемент, тоді струм кореляції максимальний і дорівнює: $I_3 = 3$
 $I'_3 = 3$ $i_k = 13$.

САФ може бути побудована з застосуванням тіньових методів. Така система заснована на тому, що в площині зображення розташована діафрагма, яка по різному обмежує світлові пучки, залежно від відсутності або наявності розфокусування. Схема такої системи показана на рис. 5.8. Фотоприймачі розташовані істотно далі за діафрагмою і формують електричний сигнал, що керує основним об'єктивом.

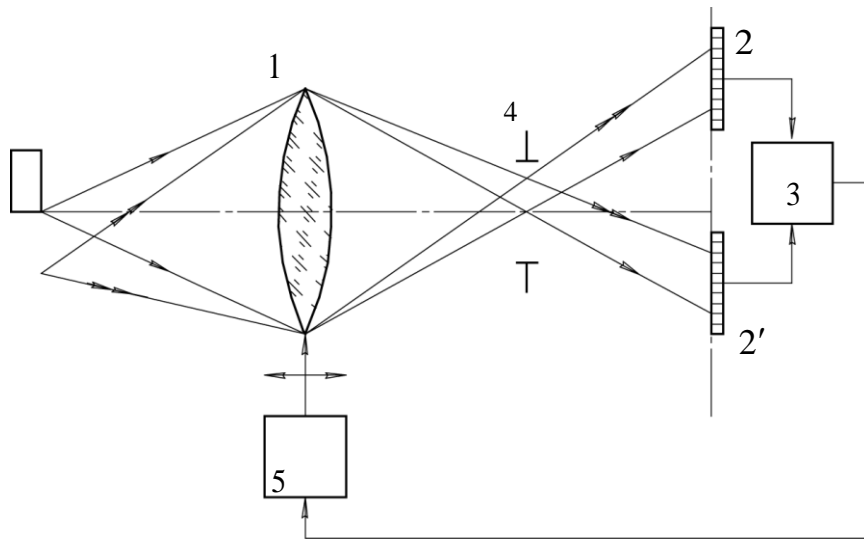


Рис.5.8. Тіньовий метод автофокусування:

1– об'єктив; 2,2' – фотоприймачі; 3 – мікропроцесор; 4 – діафрагма; 5 – двигун

Спочатку проводиться налаштування схеми, під час якого в розрахунковому положенні зфокусованого об'єктива, діафрагма розташовується в його фокальній площині і різницевий сигнал з фотоприймачів 2 і 2' дорівнює нулю. Під час розфокусування об'єктива змінюється положення його фокальної площини відносно діафрагми. Таким чином, діафрагма по різному вин'єтує світлові пучки залежно від знаку

розфокусувань. Відбувається розбалансування схеми і різницеvim сигналом з блоку 3 управляють двигуном 5. Прикладом використання такої схеми є фотоапарат Pentacon.

Схема пристрою, що застосовує нелінійність люксамперних характеристик фотоприймачів показана на рис. 5.9. Згідно рис. 5.9 зображення ділянки об'єкту і фону 1, проектується фокусуючим об'єктивом 2 на відповідну поверхню приймача 3. Приймач має нелінійну люксамперну характеристику, коли $E_{пор}$ відповідає струму насичення $i_{нас.}$ при цьому струм з фотоприймача залежить від різкості зображення на його поверхні. Струм вимірюється пристроєм 4 і досягши мінімального струму з фотоприймача, визначається положення фокусування об'єктиву 2. Заздалегідь система налаштовується так, що при розмитій межі між світлими і темними ділянками в площині зображення (положення розфокусування) освітленість відповідає максимальному струму. Збільшення освітленості на світлій ділянці не дає збільшення струму, оскільки режим насичення. У той же час зменшується площа освітленої ділянки на поверхні фотоприймача, що приводить до мінімізації струму.

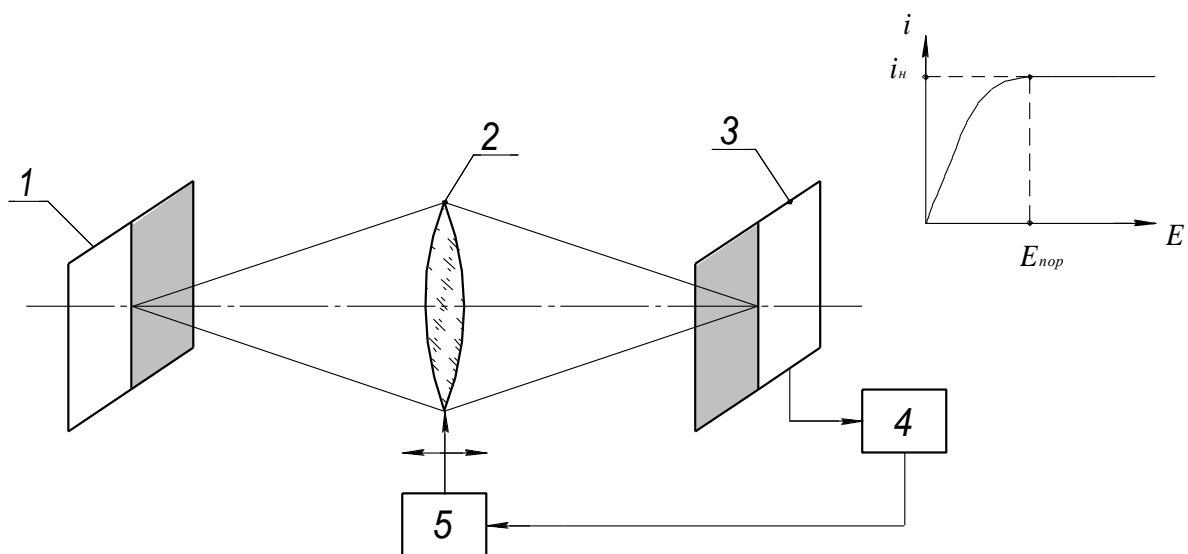


Рис. 5.9. Схема пристрою автофокусування, що застосовує нелінійність люксамперних характеристик фотоприймачів:

1 – об'єкт і фон; 2 – об'єктив; 3 – приймач; 4 – мікропроцесор; 5 – двигун

Системи фокусування з подовжнім скануванням будуються за схемою на рис. 5.10.

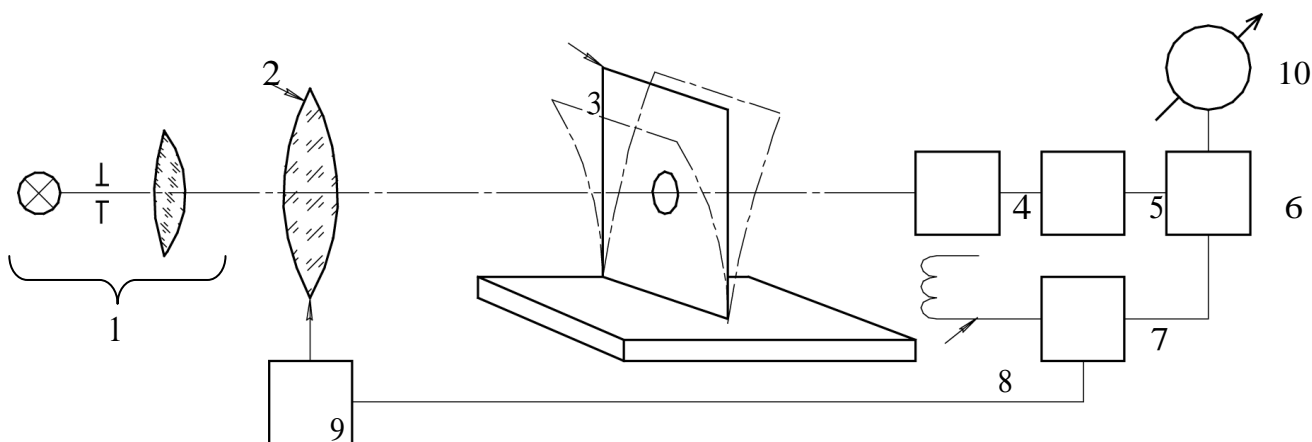


Рис. 5.10. Система фокусування з подовжнім скануванням:

- 1 – коліматор; 2 – об'єктив; 3 – діафрагма на плоскій пружині; 4 – фотоприймач;
 5 – підсилювач; 6 – електронний блок; 7 – генератор синусоїдальної напруги;
 8 – електромагніт; 9 – привод; 10 – синхронний детектор

Під час подовжнього сканування аналізатор зображення (точкова діафрагма) 3 сканує зображення в подовжньому напрямі. При цьому потік випромінювання, що проходить через діафрагму, змінюється від максимального, коли діафрагма в площині зображення, до мінімального, коли діафрагма знаходиться в зоні розфокусування. Положення діафрагми визначає електронний блок 6. Потік від коліматора 1 попадає в об'єктив, діафрагма на плоскій пружині 3 коливається від електромагніту, живленого генератором синусоїдальної напруги 7. За діафрагмою розташовується фотоприймач 4 і підсилювач 5. Вихідна напруга з фотоприймача містить дві гармонійні складові, одна з частотою модуляції f , а друга з подвійною частотою $2f$, де f – частота коливань пружинної діафрагми. Відносний склад гармонік подвійної і одинарної частот дає інформацію про міру розфокусування. Якщо система сфокусована, то переважає сигнал подвійної частоти, а при розфокусуванні починає переважати сигнал одинарної частоти.

Частотний склад гармонік аналізує синхронний детектор 10. Перевагою такої системи є незалежність результатів виміру від таких параметрів як потік випромінювання, чутливість приймача і підсилювача. Об'єктив з фокусною відстанню 35 мм був сфокусований такою системою з точністю 1 мкм.

5.5. Поняття центрування об'єктів. Методи компенсації децентрувань

Децентрування об'єктів характеризується неспівпадінням оптичної і геометричної вісей об'єктива або лінзи. Оптична вісь – це пряма, яка проходить через центри кривизни оптичних поверхонь. Геометрична вісь – це пряма, яка співпадає з віссю циліндра або конуса, утвореного бічною поверхнею лінзи.

Розрізняють два види децентрувань (рис. 5.11):

- децентрування першого роду – взаємний кутовий нахил оптичної вісі (ОВ) і геометричної вісі (ГВ);
- децентрування другого роду – взаємне поперечне зрушення оптичної і геометричної вісей.

Величина децентрування регламентується кутом, а також відстанню між оптичною і геометричною вісями ΔC_1 і ΔC_2 у площинах, які співпадають з центрами кривизни сферичних поверхонь

$$\Delta C_1 = R_1 \alpha \quad \Delta C_2 = R_2 \alpha. \quad (5.37)$$

При виготовленні лінз децентрування виникають під час склеювання, у процесі виготовлення оправ лінз, а також унаслідок зрушень і нахилів лінз в оправках за наявності зазорів. Наявність децентрувань спричиняє хроматизм в оптичних системах. Допуск на децентрування може бути позиційний у вигляді умовного позначення, або у вигляді примітки на полі креслення оптичної деталі.

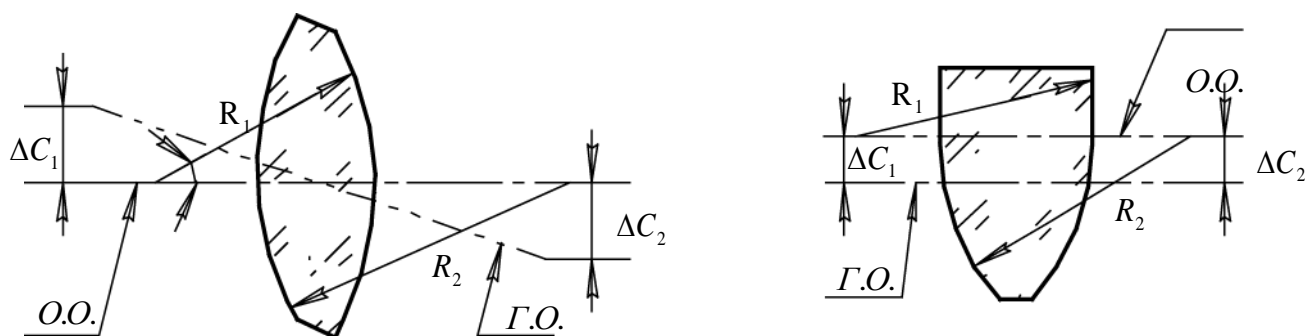


Рис. 5.11. Види децентрувань

Якщо вимоги до децентрування задаються у вигляді примітки на полі креслення, то робляться такі записи: «Децентрування поверхні Б при опорі на поверхні А і В не більше 0,01».

Проблему центрування можна розділити на три завдання:

- центрування одиночних лінз;
- центрування лінз при збірці складних об'єktivів;
- центрування об'єktivів по відношенню до заданих баз.

Для центрування одиночних лінз використовується автоколімаційна трубка Забеліна. Для центрування окремих лінз при збірці складних об'єktivів використовуються технологічні і конструкторські методи. Технологічні методи передбачають центрування лінз або лінз в оправках з подальшою установкою на посадочне місце. Конструктивні методи передбачають компенсацію поперечних зрушень лінз з подальшою фіксацією герметиком або компенсацію нахилом лінз. Для контролю точності центрування при цьому використовується метод точкової діафрагми або контрастний метод із застосуванням одномодового лазера. При використанні точкових діафрагм на посадочні місця лінз встановлюють точкові діафрагми. Метод контрасту з використанням одномодового лазера передбачає центрування кожної з лінз безпосередньо перед установкою в об'єktiv. При центруванні об'єktivів по відношенню до заданих баз розрізняють три групи завдань:

- коли оптична або візирна вісь системи має бути паралельна заданій площині;
- коли оптична або візирна вісь системи має бути паралельна заданій вісі;
- коли оптична або візирна вісь системи повинна збігатися із заданою віссю.

Ці завдання вирішують за допомогою юстувальних пересувань елементів схеми.

5.6. Класифікація окулярів

За призначенням і конструктивними особливостями окуляри діляться:

- окуляри телескопічних систем;
- окуляри мікроскопів;
- окуляри автоколімаційні.

Основні характеристики окулярів такі:

- фокусна відстань f'_{ok} ;
- збільшення $\Gamma = \frac{250}{f'_{ok}}$;
- кут поля зору $2\omega'$;
- діаметр вихідної зіниці D' ;
- видалення вихідної зіниці S'_p .

Як окуляри телескопічної системи використовують окуляри Рамсдена, Кельнера, Ерфле першого і другого роду, симетричний окуляр і ширококутний. За характером виправлення аберації, окуляри розділяють на набори. Кожен з наборів містить окуляри з фокусними відстанями: 20, 25, 30, 35, 40, 50 мм.

У мікроскопах, як основні типи окулярів, застосовують окуляри Гюйгенса, ортоскопічний, компенсаційний, симетричний і ширококутний. Діоптрійне наведення в цих окулярах може здійснюватися пересуванням окуляра в корпусі мікроскопа уздовж вісі.

До автоколімаційних окулярів відносять три типи окулярів:

- окуляр-куб;
- окуляр Аббе;
- окуляр Гауса.

Схема окуляра-куб показана на рис. 5.12. Переваги окуляра: велике збільшення, відсутність екранування поля зору, висока точність виміра. Недоліки окуляра: великі втрати світла, складність юстування сіток.

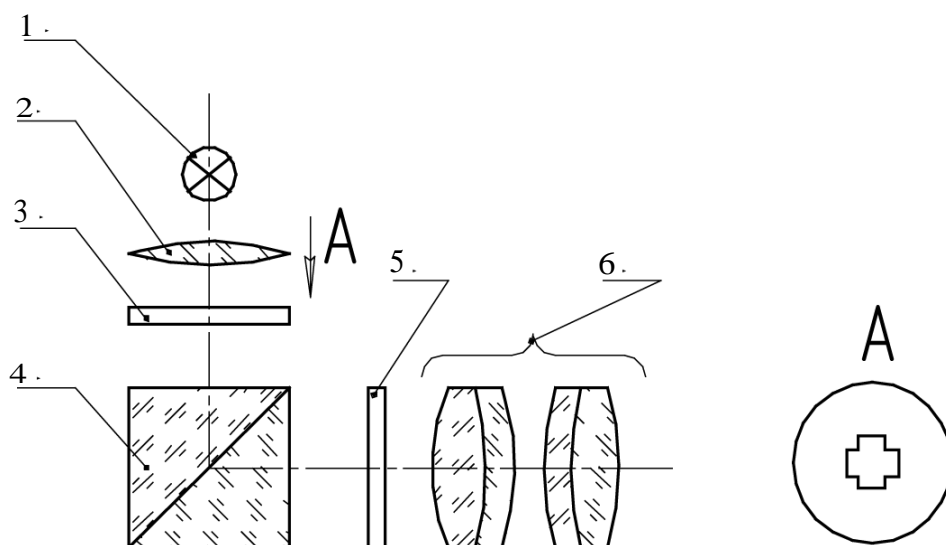


Рис. 5.12. Окуляр-куб:

1 – джерело випромінювання; 2 – конденсорна лінза; 3 – сітка-тест об'єкт;
4 – світлоділильний куб; 5 – вимірювальна сітка з шкалою; 6 – окуляр

Схема окуляра Аббе показана на рис. 5.13. Перевага окуляра – висока світлосила. Недолік окуляра – екранування центру поля зору.

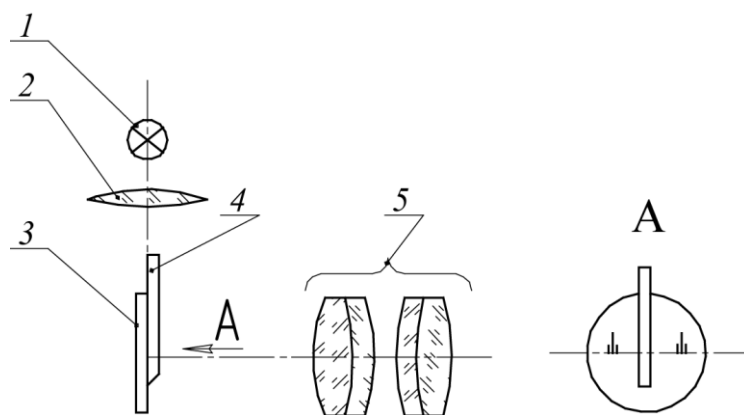


Рис. 5.13. Окуляр Аббе:

1 – джерело; 2 – конденсор; 3 – вимірювальна сітка; 4 – призма підсвічування;
5 – симетричний окуляр

Схема окуляра Гауса показана на рис. 5.14. Перевага окуляра Гауса – відсутність екранування. Недоліки окуляра: великі втрати світла, аберація, що вноситься напівпрозорим дзеркалом.

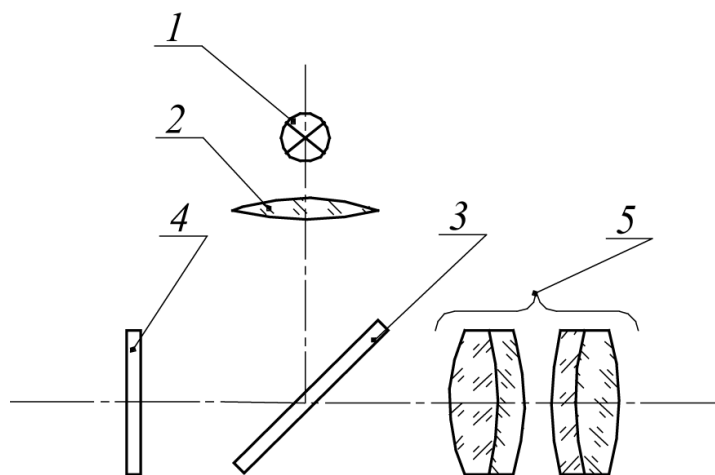


Рис. 5.14. Окуляр Гауса:

1 – джерело; 2 – конденсор; 3 – світлоділильне дзеркало; 4 – сітка; 5 – окуляр

5.7. Конструювання об'єктивів і окулярів

До конструкторської об'єктивів і окулярів пред'являються такі вимоги:

- можливість пересування уздовж вісі для фокусування;
- можливість взаємного пересування компонентів складного об'єктиву для компенсації похибки фокусної відстані;
- можливість забезпечення центрування компонентів об'єктиву і окуляра;
- необхідність точної установки об'єктиву відносно базових напрямів.

Кріплення елементів фокусуючих вузлів здійснюється методами розглянутими далі.

Метод завальцовки

Для кріплення лінз з діаметром 10 мм і менше, а так само оптичних деталей з діаметром до 80 мм і склеєних блоків з діаметром до 50 мм застосовують метод завальцовки. Матеріалами для оправ є: латунь (Л62, ЛС59-1), дюралюміній (Д1, Д6, Д16), низковуглеводні або інші пластичні конструктивні сталі (СТ20, СТ30).

На робочих кресленнях оправ застосовуються такі посадки.

1. Для лінзи – d_{11} .
2. Для оправ :

- при підвищеній точності центрування(до 0,02мм.) – Н6,Н7;
- при середній точності центрування(до 0.05мм.) – Н8,Н9;
- при зниженій точності центрування (більше 0,05мм.) – Н11.

При кріпленні лінзового блоку на нецентруючі лінзи дається посадка c_{11} . Окрім цього застосовуються посадки для одиночної лінзи d_{11} і h_{11} .

Переваги методу завальцовки:

- висока надійність кріплення(особливо для лінз малого діаметру);
- відсутність пережимів в склі;
- високоточне поєднання оптичних і механічних баз.

Недоліки методу завальцовки:

- низька надійність при великих габаритах деталей;
- відсутність можливостей компенсації термічних деформацій.

Кріплення різьбовими кільцями

Різьбове з'єднання деталей застосовуються тоді, коли не можна використовувати кріплення завальцовкою. Діаметр різьбового кільця повинен бути на 0,1÷0,5 мм більш ніж діаметр отвору під лінзу. Лінза повинна виступати на 0,5÷1,5 мм за кромку отвору під лінзу. При кріпленні лінзового об'єктиву різьбовим кільцем із зовнішнім різьбленням пред'являються такі вимоги до конструкції різьбового кільця. Товщина кільця повинна складати 3–4 кроки різьблення, а проріз під інструмент повинен складати третину товщини. Як матеріал для виготовлення оправ і різьбових кілець застосовують латунь, різні марки сталей, незагартовані алюмінієві сплави, інколи титанові або берилієві сплави. При неможливості кріплення об'єктива різьбовими кільцями застосовують спосіб завальцовки. Кріплення різьбовими кільцями не рекомендується для кріплення лінз з діаметром меншим 10 мм. Крок різьблення різьбових кілець може бути 0,5; 0,75; 1,0 мм. При кріпленні однієї лінзи використовуються посадки:

- для оправ – Н9;
- для лінзи – е9.

Для склеєних блоків використовуються посадки:

- для центруючої лінзи – e_9 ;
- для нецентруючої лінзи – c_9 ;
- для оправы – H_9 .

Кріплення в ексцентрикових оправах

Ексцентрикові оправы разом з ексцентриковими кільцями дозволяють пересувати лінзу в поперечних напрямках в діапазоні $0,5 \div 1$ мм.

Кріплення методом гальванічного нарощування металу в місцях з'єднань

Головним чином застосовуються в мікрооб'єктивах.

Кріплення дротяним кільцем.

Для кріплення використовується пружинний дріт з діаметром $0,4 - 1,0$ мм.

Кріплення лінз приклеюванням.

Для приклеювання лінз до оправ застосовуються такі матеріали.

1. Клеї:

- акрилові;
- епоксидні (ОК-50П, ОК-72);
- поліефірні (ОК-90);
- поліуретанові (ПУ-2);
- шеллачні.

2. Герметики:

- УТ-32, УТ-34;
- по ДСТУ13489-79:
- У-30М.

Кріплення пружинистими планками.

Використовується для лінз, що працюють в умовах перепадів температур і лінз не круглої форми.

При конструюванні окулярів розраховують діоптрійну шкалу і окулярне різьблення. Розрахунок має дві стадії – попередню і остаточну. Під

час попереднього розрахунку задаються попереднім кутом β_{np} , при повороті на який здійснюється налаштування, і при цьому визначають попереднє число заходів різблення за формулою:

$$n = \frac{360N(f'_{ок})^2}{1000P\beta_{np}}, \quad (5.38)$$

де N – діапазон діоптрійного наведення;

P – крок окулярного різблення;

$$\beta_{np} = 270 \div 320^\circ.$$

Визначивши n вибирають найближче значення числа заходів різблення з ДСТУ, де передбачено такі числа заходів: 1; 2; 4; 6; 8; 12; 16; 20. Остаточний розрахунок визначає кут повороту окуляра для діоптрійного наведення:

$$\beta = \frac{360N(f'_{ок})^2}{1000Pn_{ост}}. \quad (5.39)$$

Кутова відстань між діленнями діоптрійної шкали визначається співвідношенням $\alpha = \frac{\beta}{N}$.

За конструкцією розрізняють три типи конструкції окулярів.

1. При діоптрійному наведенні обертається наочник окуляра.
2. При діоптрійному наведенні наочник залишається нерухомим.
3. Окуляр з внутрішнім фокусуванням.

Приклади конструкцій окулярів показані на рис. 5.15–5.17.

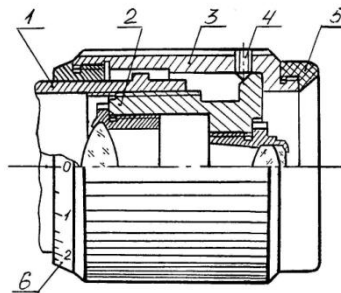


Рис. 5.15. Окуляр з наочником, що обертається: 1 – тубус; 2 – корпус; 3 – муфта; 4 – гвинт; 5 – наочник; 6 – діоптрійна шкала

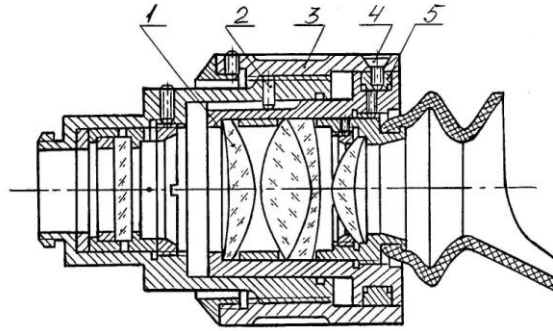


Рис. 5.16. Окуляр з нерухомим наочником: 1 – лінзи окуляра; 2 – щпонка; 3 – кільце; 4 – гвинт; 5 – сухар

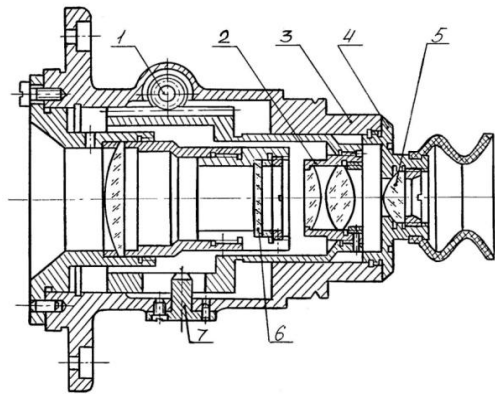


Рис. 5.17. Окуляр з внутрішнім фокусуванням: 1 – кремал'єра; 2 – оправка з лінзами; 3 – корпус; 4 – оправка; 5 – очкова лінза; 6 – сітка; 7 – шпонка

Приклади конструкцій об'єктивів показані на рис. 5.18 – 5.21.

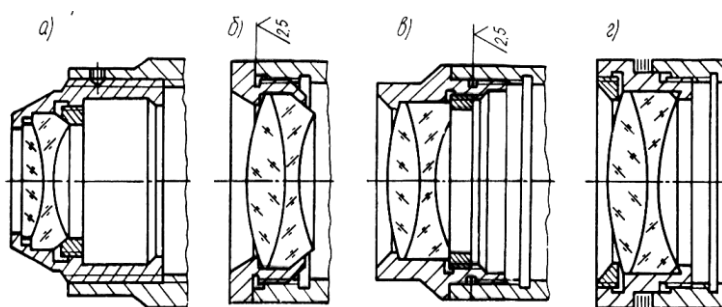


Рис. 5.18. Конструкція дволінзового об'єктива при фокусуванні:
a – обертанням оправки по різьбі; *б* – підрізанням торця оправки; *в* – підгонкою розміру кільця; *г* – установкою прокладок

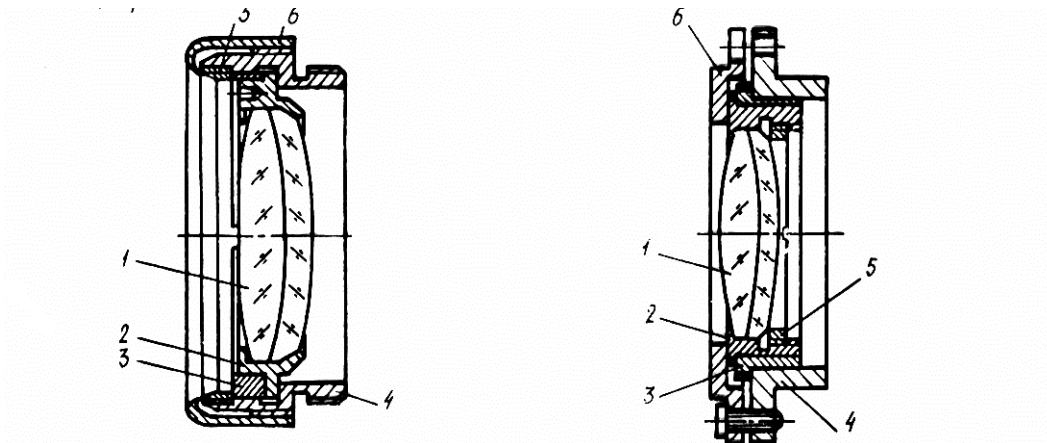


Рис. 5.19. Об'єктив з ексцентриковими оправами: 1 – об'єктив; 2 – ексцентрикова оправа; 3 – кільце ексцентричне; 4 – корпус; 5 – кільце різьбове; 6 – кільце накладне

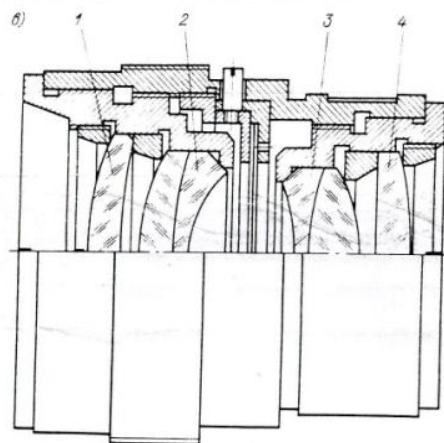


Рис. 5.20. Фотографічний об'єктив: 1 – фронтальна лінза; 2,3 – склеєні лінзові блоки; 4 – плоскоопукла лінза

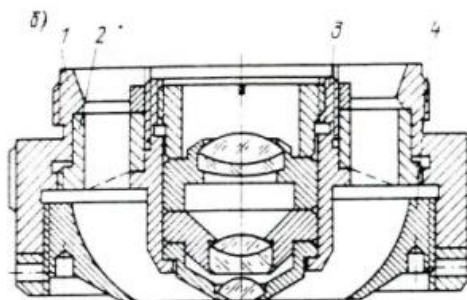
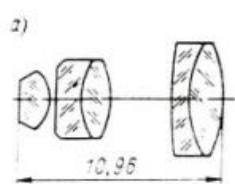


Рис. 5.21. Епіаоб'єктив ОЕ-1: 1 – корпус; 2 – перехідна оправа; 3 – мікрооб'єктив; 4 – параболічне дзеркало

Контрольні питання

1. Основні характеристики об'єктів і окулярів.
2. Класифікація об'єктів за призначенням.
3. Класифікація об'єктів за типами.
4. Спектральні діапазони роботи інфрачервоних об'єктів.
5. Вимоги до точності позиціювання об'єктів.
6. Похибки конструкцій об'єктів.
7. Вплив умов експлуатації на характеристики фокусуючих вузлів.
8. Характеристики термокомпенсаторів розфокувань.
9. Характеристики термокомпенсаторів перетискань.
10. Систем автофокусування активного типу.
11. Систем автофокусування пасивного типу.
12. Систем автофокусування тіньового типу.
13. Систем автофокусування з подовжнім скануванням.
14. Систем автофокусування з нелінійним фотоприймачем.
15. Систем автофокусування з поперечним скануванням.
16. Поняття центрування фокусуючих вузлів і методи центрувань.
17. Класифікація окулярів.
18. Типи автоколімаційних окулярів.
19. Типи окулярів для телескопічних систем.
20. Типи окулярів для мікроскопів.
21. Методи кріплення лінз.
21. Послідовність розрахунку діоптрійної шкали окулярів.
22. Матеріали що застовуються для виготовлення лінз.
23. Вимоги до точності виготовлення лінз.
24. Вимоги до точності виготовлення оправ.
25. Надати приклади конструкцій об'єктів.
26. Надати приклади конструкцій окулярів.

РОЗДІЛ 6

КОНСТРУЮВАННЯ ВУЗЛІВ З ДЗЕРКАЛЬНО-ПРИЗМАТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ

6.1. Класифікація дзеркально-призматичних систем.

Матриця дії та принципи конструювання вузла плоского дзеркала

За допомогою дзеркально-призматичних систем (ДПС) в приладах вирішують такі завдання.

1. Змінюють напрям пучків променів для покращення компоновки приладів.
2. Обертають зображення з метою отримання прямого зображення.
3. Поєднують пучки променів і розділяють їх.
4. Застосовують для юстування приладу (ДПС дозволяє пересувати, нахилити і повертати площину зображення).
5. ДПС в скануючих пристроях дозволяють розширити поле зору приладу.
6. За допомогою диспергуючих призм розкладають випромінювання в спектр.
7. За допомогою поляризаційних призм поляризують випромінювання.

Переваги призм в порівнянні з дзеркалами такі:

- висока жорсткість конструкції;
- спрощено юстування;
- спрощені питання кріплення;
- можливість використання явища повного внутрішнього відбиття (ПВВ).

Зараз відомо більше ста різновидів ДПС, тому необхідна класифікація цих систем. В основу класифікації покладені такі властивості ДПС.

1. Парність або не парність числа віддзеркалень в системі.
2. Величина і знак кута повороту зображення навколо основного незмінного напрямку в системі, тобто такого напрямку при падінні уздовж якого, промінь не змінює свого напрямку або змінює його на протилежне. Для плоского дзеркала основний незмінний напрямок збігається з напрямом нормалі до поверхні, для кутового дзеркала з напрямом ребра.
3. Величина і напрям вектора постійного зсуву зображення.

Відповідно до цих ознак всі ДПС діляться на три типи і сім класів.

Тип ДПС визначається кількістю віддзеркалень:

- А – одне віддзеркалення;
- Б – два віддзеркалення;
- В – три віддзеркалення.

Класи ДПС систем такі:

- 1 клас – А – плоске дзеркало;
- 2 клас – Б – кутове дзеркало (у окремому випадку – прямокутне дзеркало з кутом $\sigma = 90^\circ$);
- 3 клас – Б – 0 – дзеркальний ромб (окремий випадок кутового дзеркала, коли $\sigma = 0^\circ$);
- 4 клас – В – потрійне дзеркало з центром в точці взаємоперетинання дзеркал;
- 5 клас – В – 180 – триєдр прямокутний (окремий випадок потрійного дзеркала грані якого взаємоперпендикулярні);
- 6 клас – А + Б – 0 – плоске дзеркало у поєднанні з ромб призмою (віддзеркалення із зрушенням);
- 7 клас – Б + Б – 0 – кутове дзеркало у поєднанні з ромб призмою (поворот із зрушенням).

Матриця дії плоского дзеркала в нерухомій системі координат має вигляд [1]:

$$M' = \begin{vmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_xN_y & 1 - 2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_zN_x & -2N_zN_y & 1 - 2N_z^2 \end{vmatrix}, \quad (6.1)$$

де N_x , N_y , N_z – проекції нормалі плоского дзеркала на відповідні вісі координат.

Якщо відомий векторний вираз для променя, що падає на плоске дзеркало, то векторний вираз для відбитого променя можна знайти з виразу:

$$\vec{A}' = M\vec{A}, \quad (6.2)$$

де \vec{A} – векторний вираз для падаючого променя;

\vec{A}' – векторний вираз для відбитого променя.

В рухомій системі координат, в якій вісь z пов'язана з нормаллю до плоского дзеркала матриця дії має наступний вигляд:

$$P = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{vmatrix}. \quad (6.3)$$

Пересування плоского дзеркала, що діють, широко застосовуються при конструюванні вузлів для виконання різних робочих функцій, а також використовуються для юстування приладу. Ці ж пересування можуть надавати і шкідливу дію, оскільки впливають на положення і інші характеристики зображення. Для прикладу розглянемо вплив зрушення плоского дзеркала на положення площини зображення (див. рис. 6.1).

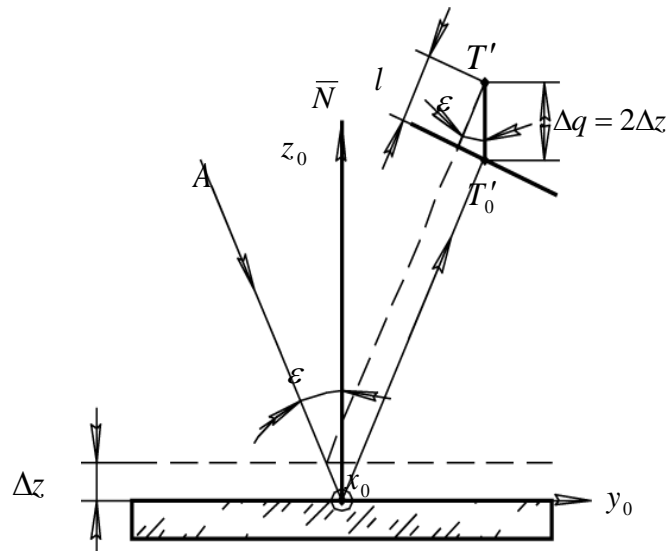


Рис. 6.1. Зрушення плоского дзеркала

На рис. 6.1 T_0' і T' – зображення крапки в площині зображення до і після зрушення плоского дзеркала на величину Δz . Згідно рисунку в системі координат XYZ можливі такі пересування плоского дзеркала: Δx , Δy , Δz – зрушення уздовж вісей; γ_x , γ_y , γ_z – повороти навколо вісей. З лінійних пересувань діє зрушення Δz , з кутових – повороти γ_x і γ_y . Наприклад, зрушення Δz приводить до децентрування і розфокусування.

Децентрування, як видно з рис. 6.1 визначиться так:

$$t = 2\Delta z \cdot \sin \varepsilon, \quad (6.4)$$

де ε – кут падіння.

Розфокусування визначиться так:

$$l = 2\Delta z \cdot \cos \varepsilon. \quad (6.5)$$

Для визначення впливу пересувань плоского дзеркала, що діють, на параметри зображення розглянемо рис. 6.2, де показаний варіант побудови зображення об'єктивом в площині шкали. На рисунку введені такі позначення: $x_{ш}, y_{ш}, z_{ш}$ – вісі координат, вздовж яких можливе пересування шкали; x_3, y_3, z_3 – вісі координат, вздовж яких можливе пересування дзеркала; l – відстань між площиною шкали і оптичною віссю об'єктива; L – відстань від об'єктива до площини зображення.

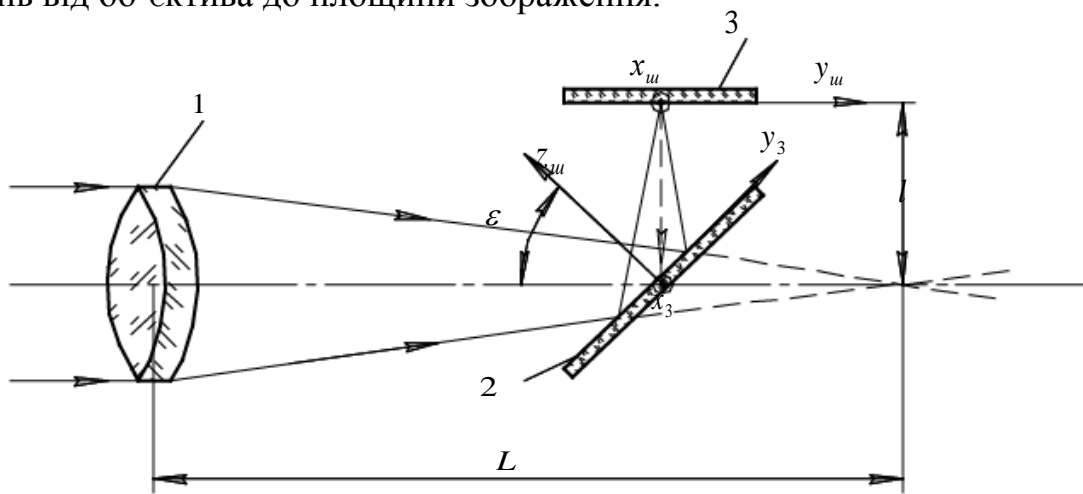


Рис.6.2. Варіант побудови зображення об'єктивом в площині шкали:
1 – об'єktiv; 2 – дзеркало; 3 – сітка, шкала або площина фотоприймача

Зрушення дзеркала вздовж нормалі у напрямі вісі z_3 викликає:

- децентрування зображення величиною

$$\Delta y_{ш} = (2 \sin \varepsilon) \Delta z_3; \quad (6.5)$$

- розфокусування зображення величиною

$$\Delta z_{ш} = (2 \cos \varepsilon) \Delta z_3. \quad (6.6)$$

Поворот дзеркала відносно вісі x_3 на величину γ_x викликає:

- зрушення зображення величиною

$$\Delta y_{ш} = (2l) \cdot \gamma_x; \quad (6.7)$$

- нахил зображення відносно вісі x

$$\gamma_{xIII} = 2\gamma_x ; \quad (6.8)$$

- похибку розміру зображення відносно вісі y_{III}

$$\delta y_{III} = (2y'_{III} \cdot L^{-1})\gamma_x \quad (6.9)$$

де y'_{III} – номінальний розмір зображення у напрямі вісі y'_{III} ;

- розфокусування вздовж вісі z_{III}

$$\Delta z_{0III} = l\gamma_x^2 ; \quad (6.10)$$

- розфокусування на краю зображення

$$\Delta z_{крIII} = (2y')\gamma_x \pm l\gamma_x^2 . \quad (6.11)$$

Поворот дзеркала відносно вісі y_3 на кут γ_y призводить до таких похибок в площині зображення:

- зрушення зображення уздовж вісі x_{III}

$$\Delta x_{III} = (2l \cdot \cos \varepsilon)\gamma_y ; \quad (6.12)$$

- розворот зображення відносно вісі z_{III}

$$\gamma_{zIII} = (2 \sin \varepsilon)\gamma_y ; \quad (6.13)$$

- нахил площини зображення відносно вісі y_{III}

$$\gamma_{yIII} = (2 \cos \varepsilon)\gamma_y ; \quad (6.14)$$

- похибку розміру зображення уздовж вісі x_{III}

$$\delta x_{III} = (2y'_x \cdot \cos \varepsilon \cdot L^{-1})\gamma_y ; \quad (6.15)$$

де y'_x – розмір зображення уздовж вісі x ;

- розфокусування на вісі зображення

$$\Delta z_{oIII} = l \cdot \cos \varepsilon \cdot \gamma_y^2 ; \quad (6.16)$$

- розфокусування на краю зображення

$$\Delta z_{крIII} = (2y'_x \cdot \cos \varepsilon)\gamma_y \pm (l \cdot \cos \varepsilon)\gamma_y^2 . \quad (6.17)$$

Враховуючи розглянуті чинники, при необхідності точного позиціонування плоского дзеркала в конструкції вузла кріплення необхідно передбачити можливість його пересувань Δz , γ_x і γ_y для виконання відповідних юстувань. Один з варіантів раціональної конструкції вузла плоского дзеркала показаний на рис. 6.3.

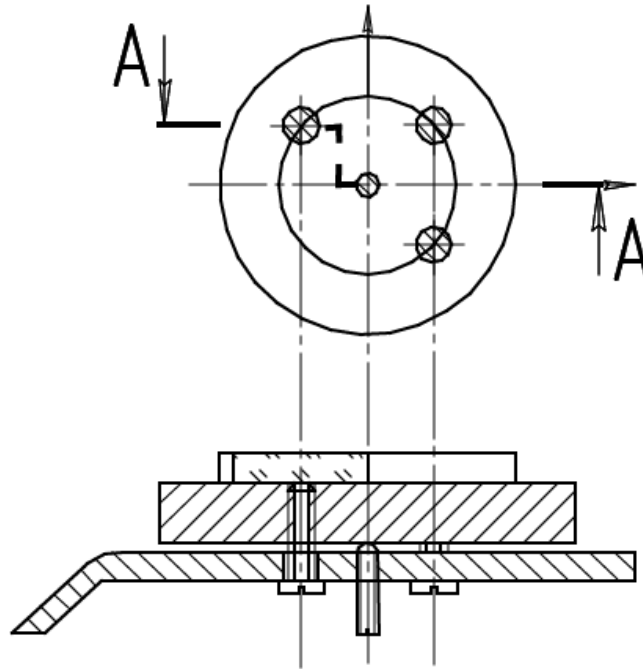


Рис. 6.3. Варіант раціональної конструкції вузла плоского дзеркала

Як видно з рис. 6.3. для пересування дзеркала вздовж нормалі достатньо регулювати центральний гвинт при відпущенні трьох периферійних гвинтах. Для нахилу площини дзеркала на кути γ_x і γ_y треба робити юстування за допомогою трьох гвинтів розташованих під кутом 90° .

Для виготовлення плоских дзеркал можуть використовуватися матеріали: К8, ЛК5, кварцеве скло (стабільно по відношенню до коливань температури). Для великогабаритних дзеркал застосовуються сітали, церодур, карбід кремнію, берилій. Часто в конструкціях застосовують склометалічні дзеркала. Основою таких дзеркал є сталь, титан, алюмінієві сплави, на які методом спікання наноситься тонкий шар скла. Можуть також застосовуватися і металеві дзеркала, наприклад, на основі берилієвих сплавів. В тому випадку, якщо як підкладка використовується скло, необхідно

витримувати певні пропорції між товщиною дзеркала d і його максимальним лінійним розміром l_{\max} .

1. Для точних дзеркал (інтерференційні, спектральні прилади)

$$d \geq \left(\frac{1}{5} \div \frac{1}{7} \right) l_{\max}, \quad (6.18)$$

де l_{\max} – максимальний лінійний розмір дзеркала.

2. Для дзеркал середньої точності (тепловізійні, скануючі, візорні прилади)

$$d \geq \left(\frac{1}{8} \div \frac{1}{10} \right) l_{\max}. \quad (6.19)$$

3. Грубі дзеркала (у освітлювальних системах):

$$d \geq \left(\frac{1}{11} \div \frac{1}{20} \right) l_{\max}. \quad (6.20)$$

6.2. Матриця дії вузла кутового дзеркала та приклади її застосування

Кутові дзеркала (КД) широко застосовуються в оптичних приладах. Окрім власне кутового відбивача застосовуються різні види призм, наприклад, БР-180⁰, пентапризма, полупентапризма і ін.

Переваги кутових дзеркал такі:

1. Напрямок відбитого від кутового дзеркала променя не залежить від орієнтації граней КД, а визначається лише величиною двогранного кута при ребрі так, що кут між падаючим і відбитим променями завжди дорівнює 2σ , де σ – кут при ребрі КД. Тобто, КД повертає площину зображення відносно площини предмета навколо ребра на кут 2σ .
2. Якщо кутове дзеркало розташувати в пучку променів, що сходиться, то зрушення ребра КД вздовж особливих напрямів дозволяє незалежно вирішувати задачу центрування або фокусування оптичних систем.
3. Повороти ребра КД відносно тих же особливих напрямів дозволяють незалежно вирішувати питання нахилу і повороту площини зображення.
4. Кріплення КД конструктивно простіше, ніж плоского.

Для отримання матриці дії кутового дзеркала загального виду потрібно скористатися матрицею дії кутового дзеркала канонічного виду, яка пов'язана з орієнтацією ребра КД, що направлене вздовж вісі z і має вигляд [1]:

$$P_0'' = \begin{pmatrix} \cos 2\sigma & -\sin 2\sigma & 0 \\ \sin 2\sigma & \cos 2\sigma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6.21)$$

Матриця КД загального виду може бути отримана на основі виразу [1]

$$M'' = S^{-1} P'' S, \quad (6.22)$$

де P'' – матриця канонічного виду;

S – матриця перетворення координат при переході від основної системи координат до нерухомої;

S^{-1} – матриця зворотнього переходу.

Зробивши необхідні перетворення отримаємо матрицю дії кутового дзеркала загального виду:

$$M'' = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [\cos 2\sigma + 2p_x^2 \sin^2 \sigma] & [-p_z \sin 2\sigma + 2p_x p_y \sin^2 \sigma] & [p_y \sin 2\sigma + 2p_x p_z \sin^2 \sigma] \\ [p_z \sin 2\sigma + 2p_x p_y \sin^2 \sigma] & [\cos 2\sigma + 2p_y^2 \sin^2 \sigma] & [-p_x \sin 2\sigma + 2p_y p_z \sin^2 \sigma] \\ [-p_y \sin 2\sigma + 2p_x p_z \sin^2 \sigma] & [p_x \sin 2\sigma + 2p_y p_z \sin^2 \sigma] & [\cos 2\sigma + 2p_z^2 \sin^2 \sigma] \end{pmatrix}, \quad (6.23)$$

де σ – кут при ребрі кутового дзеркала;

p_x, p_y, p_z – проекції орта ребра кутового дзеркала на вісі нерухомої системи координат xyz .

Покажемо на прикладі можливості використання матриці КД для вирішення задачі оцінки похибки базування пентапризми на напрямок відбитого променя і орієнтацію площини зображення. Задача формулюється наступним чином: визначити кути відхилення вихідного променя та повороту зображення, що виникають при повороті пентапризми навколо вісі, що співпадає з напрямом падаючого променя (рис. 6.4.) Вихідні дані:

- кут при ребрі пентапризми $\sigma = 45^\circ$;

- орт вектора падаючого променя $\vec{A} = \vec{i}$;
- орт вектора ребра призми $\vec{P}_0 = \vec{K}$;
- орт вектора вертикалі простору предметів $\vec{B} = \vec{K}$;
- кут поворота пентапризми α .

Необхідно визначити:

- напрям орта вектора променя, відбитого від пентапризми при її повороті на кут α ;
- напрям орта вектора зображення вертикалі при повороті пентапризми на кут α .

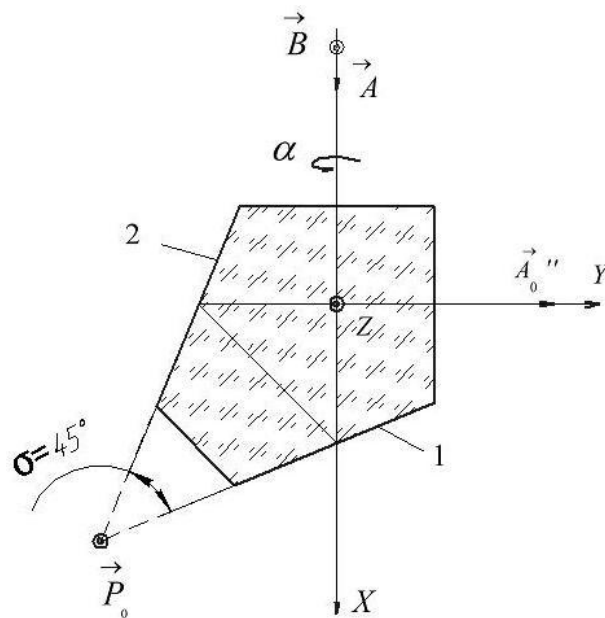


Рис. 6.4. Пентапризма

На рис. 6.4 зображено пентапризму в нерухомій системі координат XYZ . Згідно умови задачі, напрям падаючого променя позначений ортом \vec{A} співпадає з віссю OX . Головний розріз пентапризми перпендикулярний до вісі OZ , а отже, орт ребра \vec{P}_0 спрямований вздовж вісі OZ . Вертикаль простору предметів при спостереженні зі сторони вісі OZ проектується в точку, а орт вертикалі \vec{B}_0 співпадає з напрямом вісі OZ ($\vec{B}_0 = \vec{K}$).

Пентапризма є кутовим дзеркалом, що складається з двох плоских дзеркал 1 і 2 з кутом при ребрі \vec{P}_0 між ними $\sigma = 45^\circ$. Для визначення напрямку

відбитого променя \vec{A}'' та повороту площини зображення, що характеризується поворотом зображення вертикалі \vec{B}'' простору предметів, при повороті пентапризми на кут α , скористаємось співвідношеннями

$$\vec{A}'' = M''\vec{A}; \quad (6.24)$$

$$\vec{B}'' = M''\vec{B}. \quad (6.25)$$

де \vec{A} – орт вектора променя, що падає на пентапризму;

\vec{B} – орт вектора вертикалі простору предметів;

M'' – матриця кутового дзеркала.

Після повороту пентапризми на кут α навколо вісі OX , або орта \vec{A} , для орта ребра отримаємо

$$\vec{p} = -\sin \alpha \vec{j} + \cos \alpha \vec{k}. \quad (6.26)$$

Орієнтація орта ребра в нерухомій системі координат показана на рис. 6.5.

Для орта падаючого променя \vec{A} і орта вертикалі \vec{B} простора предметів, виходячи з умов задачі, маємо

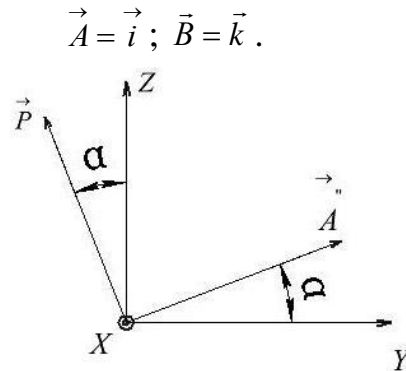


Рис.6.5. Орієнтація орта ребра призми і орта відбитого променя в нерухомій системі координат XYZ

Тоді для орта \vec{A}'' відбитого променя з урахуванням (6.23)–(6.26) знайдемо

$$\vec{A}'' = M''\vec{A} = M'' \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} \\ m_{21} \\ m_{31} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos 2\sigma \\ p_z \sin 2\sigma \\ -p_y \sin 2\sigma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ p_z \\ -p_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix} \quad (6.27)$$

На основі (6.27) запишемо векторний вираз для орта відбитого променя $\vec{A}'' = \cos \alpha \vec{j} + \sin \alpha \vec{k}$. Тобто промінь, що виходить, обертається у площині YOZ разом і синхронно з обертанням пентапризми (рис. 6.5). Розглянемо, як при цьому змінюється орієнтація вертикалі \vec{B} простору

предметів, а отже, і всього зображення. Після відбивання в пентапризмі при її вихідному положенні ($\vec{P}_0 = \vec{K}$) для зображення вертикалі отримаємо:

$$\vec{B}_0'' = M''\vec{B}_0 = M'' \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_y \sin 2\sigma + 2p_x p_z \sin^2 \sigma \\ -p_x \sin 2\sigma + 2p_y p_z \sin^2 \sigma \\ \cos 2\sigma + 2p_z^2 \sin^2 \sigma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (6.28)$$

Це очевидний результат оскільки відбиваючись в пентапризмі, напрям, що паралельний її ребру, залишається без змін. Після повороту пентапризми на кут α для напрямку зображення вертикалі знайдемо

$$\vec{B}'' = \vec{M}''\vec{B}_0 = M'' \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_y \\ 2p_y p_z \sin^2 \sigma \\ \cos 2\sigma + 2p_z^2 \sin^2 \sigma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_y \\ p_y p_z \\ p_z^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \alpha \\ -\sin \alpha \cos \alpha \\ \cos^2 \alpha \end{pmatrix}. \quad (6.29)$$

З виразу (6.29) важко уявити напрям зображення вертикалі. Необхідно перейти до площини, що ортогональна напрямку відбитого променя \vec{A}'' , тобто перевести орт \vec{B}'' в так звану променеву систему вісей $x_n y_n z_n$. Для цього необхідно помножити орт \vec{B}'' на матрицю S_n повороту вісей навколо вісі OX на кут α проти годинникової стрілки. Матриця перетворення координат має вигляд:

$$S_n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}. \quad (6.30)$$

Тоді для орта зображення вертикалі отримаємо:

$$\vec{B}_n'' = S_n \vec{B}'' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\sin \alpha \\ -\sin \alpha \cos \alpha \\ \cos^2 \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \alpha \\ 0 \\ \cos \alpha \end{pmatrix}. \quad (6.31)$$

На основі (6.31) запишемо векторний вираз для орта зображення вертикалі

$$\vec{B}_n'' = -\sin \alpha \vec{a}_n + \cos \alpha \vec{k}_n.$$

Орієнтація осей променевої системи координат, а також орта \vec{B}'' показана на рис. 6.6, з якого слідує, що при повороті пентапризми на кут α зображення вертикалі (орт \vec{B}''), а отже і будь-якого іншого напрямку простору предметів, обертається відносно вісі Oy_n променевої системи координат $x_n y_n z_n$ за годинниковою стрілкою на той же кут α .

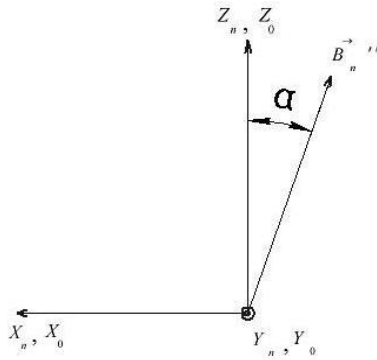


Рис. 6.6. Орієнтація осей променевої системи координат, а також орта \vec{B}''

6.3. Особливі напрями в конструкції вузла кутового дзеркала

Для визначення орієнтації особливих напрямів КД введемо такі очевидні допущення:

- при будь-якому паралельному зрушенні системи плоских дзеркал всі точки зображення зрушуються як єдине ціле, оскільки збільшення такої системи дорівнює одиниці;
- зсув однієї точки площини зображення може характеризувати зрушення всієї площини зображення;
- при віддзеркаленні від КД площина зображення обертається навколо ребра на кут 2σ ;

Розглянемо кутове дзеркало в системі координат XYZ (рис. 6.7).

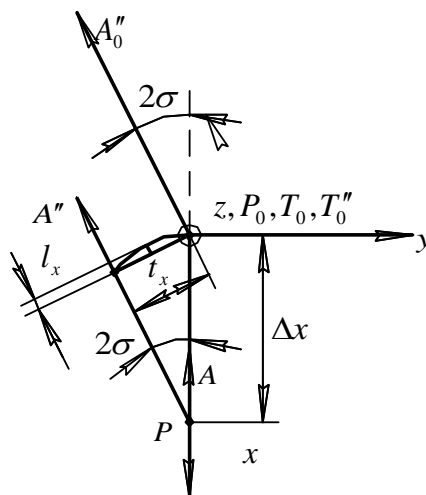


Рис. 6.7. Кутове дзеркало представлене в системі координат xuz

Положення КД визначається положенням його ребра P_0 . Точка T_0 простору предметів в номінальному положенні дзеркала збігається з

проекцією його ребра P_0 . Передбачимо, що КД зрушилося вздовж вісі x на величину Δx . Тоді зображення точки T_0 виявиться в положенні T . З рис. 6.7 видно, що при цьому виникають децентрування

$$t_x = \Delta x \cdot \sin(2\sigma) \quad (6.32)$$

і розфокусування

$$l_x = \Delta x - \Delta x \cdot \cos(2\sigma) = \Delta x(1 - \cos(2\sigma)) = 2\Delta x \cdot \sin^2 \sigma. \quad (6.33)$$

Припустимо, що КД зсувається вздовж вісі y на величину Δy , як це показано на рис. 6.8.

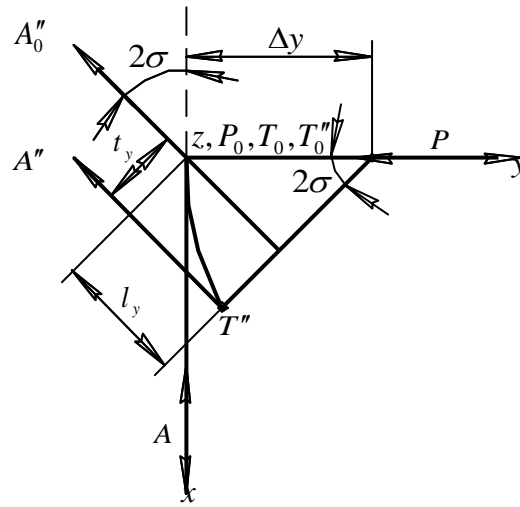


Рис. 6.8. Кутове дзеркало зсувається вздовж вісі y на величину Δy

При такому зрушенні, як видно з рис. 6.8 також виникають децентрування

$$t_y = \Delta y - \Delta y \cdot \cos(2\sigma) = \Delta y(1 - \cos(2\sigma)) = 2\Delta y \cdot \sin^2 \sigma \quad (6.34)$$

і розфокусування

$$-l_y = \Delta y \cdot \sin(2\sigma). \quad (6.35)$$

На практиці мають місце водночас обидві похибки установки КД. Тоді сумарні децентрування і розфокусування дорівнюють:

$$t_{\Sigma} = t_x + t_y = \Delta x \cdot \sin(2\sigma) + \Delta y \cdot \sin^2 \sigma = 2\sin \sigma (\Delta x \cdot \cos \sigma + \Delta y \cdot \sin \sigma); \quad (6.36)$$

$$l_{\Sigma} = l_x + l_y = \Delta x \cdot \sin^2 \sigma - \Delta y \cdot \sin(2\sigma) = 2\sin \sigma (\Delta x \cdot \sin \sigma - \Delta y \cdot \cos \sigma). \quad (6.37)$$

Для забезпечення рівності нулю значень t_{Σ} і l_{Σ} необхідно прирівняти співвідношення (6.36) і (6.37) до нуля. Але, оскільки нулю будуть рівними частини виразів в дужках, то отримаємо:

$$\Delta x \cdot \cos \sigma + \Delta y \cdot \sin \sigma = 0 \Rightarrow t_{\Sigma} = 0; \quad (6.38)$$

$$\Delta x \cdot \sin \sigma - \Delta y \cdot \cos \sigma = 0 \Rightarrow l_{\Sigma} = 0. \quad (6.39)$$

Із співвідношення (6.38) визначимо орієнтацію першого особливого напрямку КД, при зрушенні ребра вздовж якого відсутнє децентрування:

$$tg \gamma_{l_{\Sigma}=0} = -tg \sigma = \frac{\Delta x}{\Delta y}. \quad (6.40)$$

Другий особливий напрям, при зрушенні ребра КД вздовж якого відсутнє розфокусування, знайдемо із співвідношення (6.39)

$$tg \gamma_{l_{\Sigma}=0} = ctg \sigma = \frac{\Delta x}{\Delta y}. \quad (6.41)$$

Ці напрями зорієнтовані так, як показано на рис. 6.9.

З розглянутого зробимо наступний висновок. При будь-яких зрушеннях, але при малих нахилах КД в пучках променів що сходяться, існують два особливі напрями. Другий особливий напрям співпадає з бісектрисою кута між падаючим і відбитим променями і характеризується тією властивістю, що зрушення ребра КД вздовж цього напрямку не викликає розфокусування оптичної системи, а поворот ребра КД відносно цього напрямку на малий кут не викликає нахилу площини зображення. Перший особливий напрям перпендикулярний до другого і характеризується тією властивістю, що зрушення ребра КД вздовж цього напрямку не викликає децентрування зображення, а поворот ребра КД відносно цього напрямку на малий кут не викликає повороту площини зображення.

Наявність цих напрямів необхідно враховувати при конструюванні вузлів, в які входять кутові дзеркала. Це дозволяє незалежно вирішувати завдання юстування оптичних приладів при збірці. Для цього в конструкції оптичних приладів, в які входять кутові дзеркала, треба передбачити можливість малих пересувань вздовж особливих напрямів, або малих поворотів призм енного вузла навколо особливих напрямів.

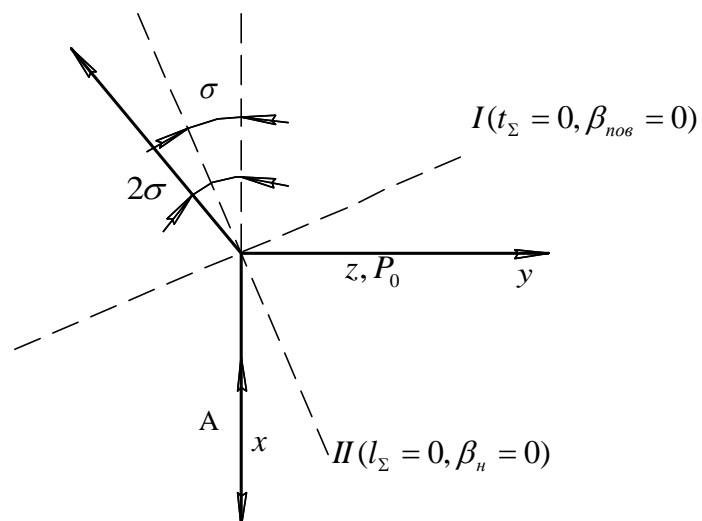


Рис. 6.9. Орієнтація особливих напрямів кутового дзеркала

На рис. 6.10 показана орієнтація особливих напрямів для призми БР-180°.

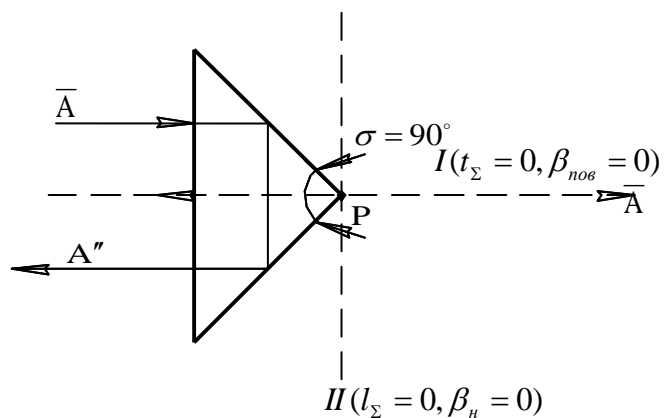


Рис. 6.10. Орієнтація особливих напрямів для призми БР-180

На рис. 6.11. показані особливі напрями для пентапризми.

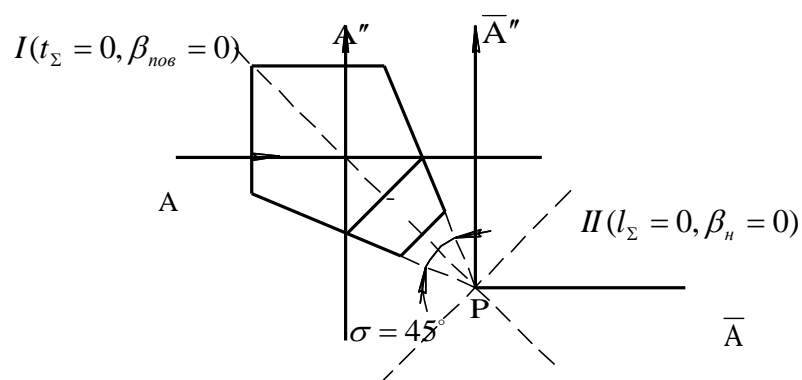


Рис. 6.11. Орієнтація особливих напрямів для пентапризми

6.4. Діючі пересування та оптимізація конструкції вузла кутового дзеркала

Пересування кутового дзеркала, що діють, розглянемо на прикладі установки пентапризми в телескопічній системі, як це показано на рис. 6.12. У систему входять об'єктив 1, пентапризма 2, шкала 3.

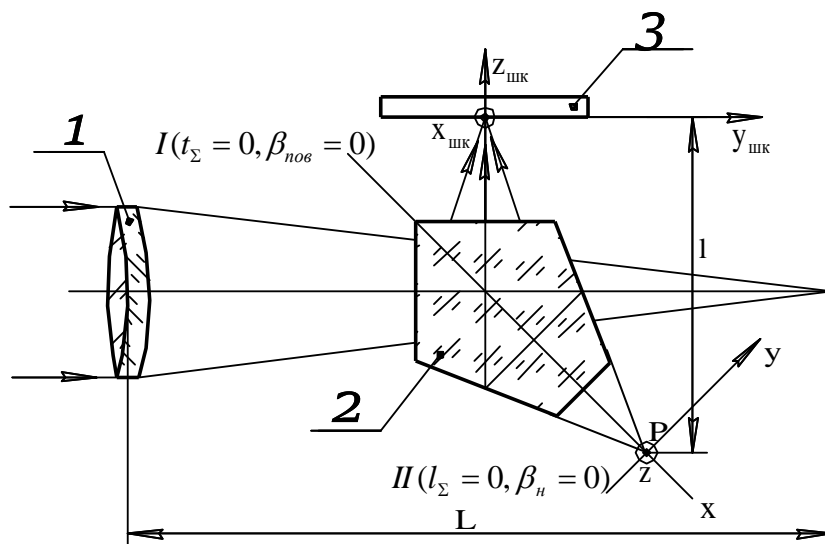


Рис. 6.12. Установка пентапризми в телескопічній системі:

1 – об'єктив; 2 – пентапризма; 3 – шкала

У системі координат пов'язаної з призмою пересуваннями, що діють, будуть зрушення ребра КД вздовж вісей X і Y , а також повороти ребра призми відносно тих же вісей. Зрушення ребра КД вздовж вісі X на величину Δx (вздовж першого особливого напрямку) призводить до:

- розфокусування зображення в площині шкали величиною:

$$\Delta z_{ш} = 2 \sin \sigma \cdot \Delta x, \quad (6.42)$$

- похибки розміру зображення вздовж вісі y , що дорівнює

$$\delta y_{ш} = [4 \sin \sigma \cdot y' \cdot L^{-1}] \Delta x, \quad (6.43)$$

де y' – номінальний (розрахунковий) розмір зображення вздовж вісі y ;
 L – відстань від об'єктиву до площини фокусування.

Зрушення ребра КД вздовж вісі Y на величину Δy призводить до:

- децентрування зображення вздовж вісі y , що дорівнює

$$\Delta y_{III} = (2 \cos \sigma) \Delta y. \quad (6.44)$$

Поворот ребра КД відносно вісі X на кут γ_x призводить до:

- нахилу площини зображення на величину, яка дорівнює

$$\beta_{III} = (2 \sin \sigma) \gamma_x. \quad (6.45)$$

Поворот ребра КД відносно вісі Y на кут γ_y є найбільш небезпечною похибкою, оскільки призводить до:

- зрушення зображення вздовж вісі x_{III} на величину

$$x_{III} = (2l \cdot \sin \sigma) \gamma_y; \quad (6.46)$$

- повороту площини зображення відносно вісі z_{III} , що дорівнює

$$\gamma_{z_{III}} = (2 \sin \sigma) \gamma_y; \quad (6.47)$$

- розфокусування вздовж вісі z_{III}

$$\Delta z_{III} = (l \cdot \sin \sigma) \gamma_y; \quad (6.48)$$

- розфокусування на краях зображення

$$\Delta x_{III} = (2 \sin \sigma \cdot y'_{x_{III}}) \gamma_y \pm l \cdot \sin \sigma \cdot \gamma_y^2; \quad (6.49)$$

- зміни розміру зображення у напрямі вісі x_{III}

$$\delta y'_{x_{III}} = (2 y'_x \cdot \sin \sigma \cdot L^{-1}) \gamma_y. \quad (6.50)$$

Приклад раціональної конструкції вузла кріплення призми БР-180 з врахуванням пересувань, що діють, представлений на рис. 6.13. Пересування, що діють, в показаній на рис. 6.13 конструкції є пересуваннями призми вздовж вісей X і Y на величини Δx і Δy . Реалізуються ці пересування пересуваннями кронштейна з призмою, а також пересуваннями і поворотами призми в середині оправи.

При конструюванні вузлів з призмами необхідно визначити габаритні розміри призм. Один з методів, який може бути застосований, це графоаналітичний метод.

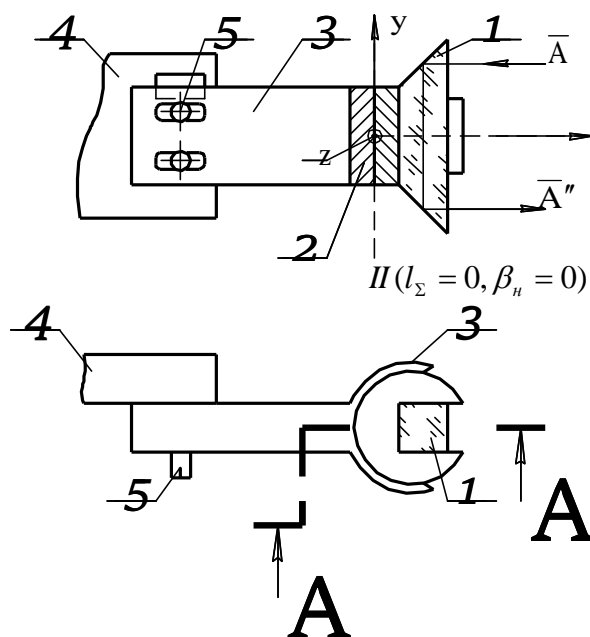


Рис. 6.13. Вузол кріплення призми БР-180:

1 – призма БР-180; 2 – оправа, в яку вклеєна призма; 3 – кронштейн кріплення;
4 – базуюча деталь; 5 – гвинт

Згідно цього методу, як видно з рис. 6.14, будується конус одна підстава якого спирається на об'єктив, а інша на сітку.

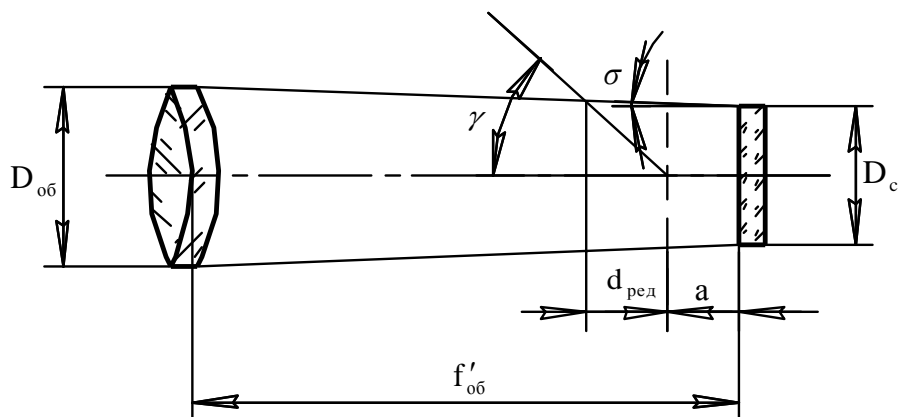


Рис. 6.14. Графоаналітичний метод

На відстані a від сітки проводять вертикальну лінію, де

$$a \geq 0,01 f'_{ок}{}^2, \quad (6.51)$$

де $f_{ок}$ – фокусна відстань окуляра.

Визначають кут σ із співвідношення

$$\operatorname{tg} \sigma = \frac{D_0 - D_c}{2f'_{об}}. \quad (6.52)$$

Після цього визначають світловий діаметр на виході призми

$$D_{свих} = D_c + 2a \cdot \operatorname{tg} \sigma. \quad (6.53)$$

Розраховують кут γ із співвідношення

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{n}{2k}, \quad (6.54)$$

де n – показник заломлення матеріалу призми;

k – коефіцієнт призми.

Вимірюють по кресленню відстань $d_{ред}$, а потім розраховують довжину ходу променя в призмі по формулі

$$l = n \cdot d_{ред}. \quad (6.55)$$

Світловий діаметр на вході призми визначають із співвідношення

$$D_{св.вх} = \frac{l}{k}. \quad (6.56)$$

Подовження, що вноситься призмою в хід променів дорівнює

$$\Delta l = (n - 1)n^{-1}l. \quad (6.57)$$

Призму необхідно встановлювати на відстані S від об'єктива

$$S = f'_{об} + \Delta l - a - l. \quad (6.58)$$

Поле зору будь-якої призми обмежене і залежить від показника заломлення і конструкції призми:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{n}{2k}. \quad (6.59)$$

Наприклад, для призми АР 90^0 кут $2\gamma = 70^\circ$, для призми БР 180^0 кут $2\gamma = 42^\circ$.

Призми з парним числом віддзеркалень дають пряме зображення, а з непарним – перевернуте. Для кріплення призм використовують установочні гвинти, пружини, планки, косинкі, стійки, шпонки і т.п.

6.5. Зведення складних дзеркально-призматичних систем до простих еквівалентів

Якою б складною не була ДПС, у результаті спрощення в паралельному ході променів теоретично вона може бути приведена до простіших еквівалентів. Наведемо правила цього приведення.

Система з трьома і більшим непарним числом віддзеркалень може бути замінена еквівалентним плоским дзеркалом, нормаль якого повернена на кут $180^\circ + \sigma_{21}$ по відношенню до нормалі третього дзеркала, де кут σ_{21} – двогранний кут між другим і першим дзеркалами. Кут, що відлічується за годинниковою стрілкою – від’ємний, а проти – додатний. Якщо кількість віддзеркалень перевищує три, то це перетворення треба починати з кінця такої ДПС, рухаючись поступово до початку.

ДПС з парним числом віддзеркалень 4, 6, 8 і більше можуть бути замінені еквівалентним кутовим дзеркалом, кут при ребрі якого може бути визначений із співвідношення:

$$\cos \sigma_y = \cos \sigma_{12} \cdot \cos \sigma_{34} - \sin \sigma_{12} \cdot \sin \sigma_{34} \cdot \cos \varphi, \quad (6.60)$$

де σ_{12} і σ_{34} – двогранні кути при першій і другій парі дзеркал;

φ – кут між напрямками ребер.

Орієнтація ребра еквівалентного кутового дзеркала визначається із співвідношення:

$$\bar{P}_y \cdot \sin \sigma_y = \bar{P}_{12} \cdot \sin \sigma_{12} \cdot \cos \sigma_{34} + \bar{P}_{34} \cdot \sin \sigma_{34} \cdot \cos \sigma_{12} - [\bar{P}_{12} \times \bar{P}_{34}] \sin \sigma_{12} \cdot \sin \sigma_{34} \quad (6.61)$$

де \bar{P}_{12} і \bar{P}_{34} – вектори, що визначають положення ребер першої і другої пари дзеркал.

Користуючись формулами (6.60) і (6.61), знайдемо еквівалент призматичної обертаючої системи Малафєєва-Порро 1-го роду, яка зображена на рис. 6.15. На рис. 6.15 показані в одній проекції дві прямокутні призми ($\sigma_{12} = \sigma_{34} = -90^\circ$) обертаючої системи Малафєєва-Порро 1-го роду з взаємно перпендикулярними ребрами ($\varphi = 90^\circ$), так що $\bar{P}_{12} = \bar{i}$, $\bar{P}_{34} = \bar{j}$. Підставляючи ці величини у формули (6.60) та (6.61), відразу знайдемо $\cos \sigma_y = 0$ або $\sigma_y = 90^\circ$, та орієнтацію ребра p_e .

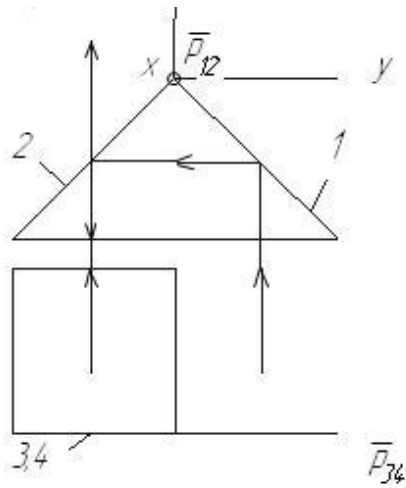


Рис. 6.15. Дзеркально-призматична обертаюча система Малафєєва-Порро 1-го рода:
1 – перша грань; 2 – друга грань; 3,4 – третя і четверта грані

$$\bar{p}_e = -[\bar{p}_{12} \bar{p}_{34}] = - \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ p_{12x} & p_{12y} & p_{12z} \\ p_{34x} & p_{34y} & p_{34z} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = -\bar{k}$$

Таким чином, призма обертаюча система Малафєєва-Порро 1-го роду приводиться до прямокутного дзеркала, ребро якого направлено по вісі z .

6.6. Сканувальна система з плоским дзеркалом. Похибки базування дзеркала і їх компенсація

Основне призначення сканувальної системи це розширення кутового поля зору оптичної системи. Найчастіше застосовується однодзеркальна сканувальна система. Вона використовується в панорамах, стереотрубах і інших приладах для спостереження. Схема використання такої системи в панорамі представлена на рис. 6.16. При скануванні дзеркало обертається навколо горизонтальної вісі з кутовою швидкістю ω . При цьому миттєве поле зору монокуляра пересувається в малому діапазоні кутів по куту місця. Крім того горизонтальна вісь обертається на 180° навколо вертикальної вісі пересуваючи миттєве поле зору монокуляра по азимуту.

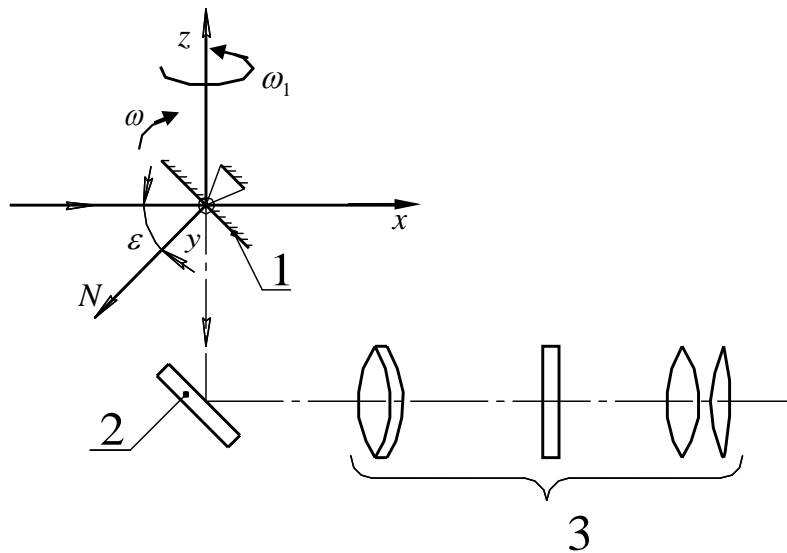


Рис. 6.16. Схема використання однодзеркальної сканувальної системи в панорамі:
1 – сканувальне дзеркало; 2 – поворотне дзеркало; 3 – монокуляр

При установці сканувального дзеркала існують три основні похибки.

1. Похибка колімації Δk – неперпендикулярність нормалі дзеркальної поверхні по відношенню до горизонтальної вісі (рис. 6.17).

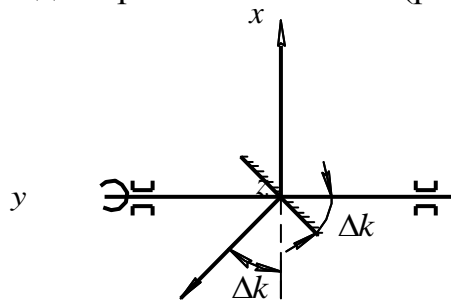


Рис. 6.17. Похибка колімації

2. Нахил горизонтальної вісі в вертикальній площині $\Delta\varphi_x$ внаслідок її розвороту відносно вісі x (рис. 6.18).

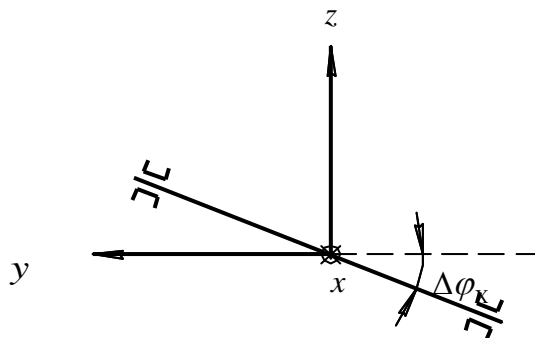


Рис.6.18. Нахил горизонтальної вісі в вертикальній площині

3. Розворот горизонтальної вісі $\Delta\varphi_z$ відносно вісі z в горизонтальній площині (рис. 6.19).

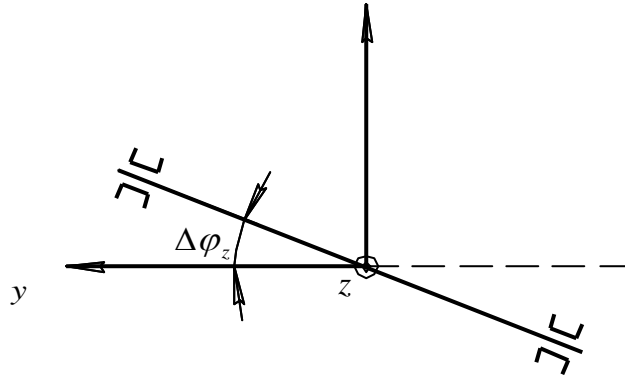


Рис. 6.19. Розворот горизонтальної вісі в горизонтальній площині

Названі первинні похибки призводять до похибок положення вісі візування в горизонтальній площині (по азимуту) і у вертикальній площині (по куту місця). Для того, щоб встановити зв'язок між похибками Δk , $\Delta\varphi_x$, $\Delta\varphi_z$ і похибками положення вісі візування в горизонтальній площині і у вертикальній площині можна скористатися матричним методом, згідно якого:

$$\vec{A}' = M\vec{A}, \quad (6.62)$$

Матриця дії плоского дзеркала, дорівнює

$$M' = \begin{vmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_xN_y & 1 - 2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_zN_x & -2N_zN_y & 1 - 2N_z^2 \end{vmatrix}, \quad (6.63)$$

де N_x , N_y , N_z – проекції нормалі скануючого дзеркала на відповідні вісі координат.

За наявності похибки Δk проекції нормалі мають такі значення (Рис. 6.17):

$$\begin{aligned} N_x &= -\sin \varepsilon \cos \Delta k \\ N_y &= -\sin \Delta k \\ N_z &= -\cos \varepsilon \cos \Delta k \end{aligned} \quad (6.64)$$

За наявності похибки $\Delta\varphi_x$ проекції нормалі мають такі значення (Рис. 6.18):

$$\begin{aligned} N_x &= -\sin \varepsilon \\ N_y &= \cos \varepsilon \sin \Delta\varphi_x \\ N_z &= -\cos \varepsilon \end{aligned} \quad (6.65)$$

За наявності похибки $\Delta\varphi_z$ проекції нормалі мають такі значення (Рис. 6.19):

$$\begin{aligned} N_x &= -\sin \varepsilon \cos \Delta\varphi_z \\ N_y &= \sin \varepsilon \sin \Delta\varphi_z \\ N_z &= -\cos \varepsilon \end{aligned} \quad (6.66)$$

Після проведення перетворень відповідно до співвідношення (6.62), отримаємо такі результати. Для відхилення вісі візування по горизонталі :

— за наявності Δk

$$\delta_{\Delta k} = (2 \cos \varepsilon) \Delta k ; \quad (6.67)$$

— за наявності $\Delta\varphi_x$

$$\delta_{\Delta\varphi_x} = (2 \cos^2 \varepsilon) \Delta\varphi_x ; \quad (6.68)$$

— за наявності $\Delta\varphi_z$

$$\delta_{\Delta\varphi_z} = (\sin 2\varepsilon) \Delta\varphi_z \quad (6.69)$$

Для відхилення вісі візування по вертикалі :

— за наявності Δk

$$i_{\Delta k} = (2 \cos^2 \varepsilon) \Delta k ; \quad (6.70)$$

— за наявності $\Delta\varphi_x$

$$i_{\Delta\varphi_x} = (2 \cos^2 \varepsilon) \Delta\varphi_x^2 ; \quad (6.71)$$

— за наявності $\Delta\varphi_z$

$$i_{\Delta\varphi_z} = 0 . \quad (6.72)$$

Із співвідношень (6.67) – (6.72) можна зробити висновок, що відхиленнями вісі візування по вертикалі за наявності похибок Δk , $\Delta\varphi_x$, $\Delta\varphi_z$ можна знехтувати, оскільки вони є похибками другого порядку кривизни. Сумарне відхилення вісі візування по горизонталі визначається співвідношенням:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_{\Delta k} + \delta_{\Delta\varphi_x} + \delta_{\Delta\varphi_z} = (2 \cos \varepsilon) \Delta k + (2 \cos^2 \varepsilon) \Delta\varphi_x + (\sin 2\varepsilon) \Delta\varphi_z . \quad (6.73)$$

З врахуванням співвідношення (6.73) можна визначити, чи можлива взаємна компенсація цих похибок. Визначимо величину δ_Σ при куті падіння $\varepsilon = 45^\circ$:

$$\delta_\Sigma = (2\cos 45)\Delta k + (2\cos^2 45)\Delta\varphi_x + (\sin 90)\Delta\varphi_z = \sqrt{2}\Delta k + \Delta\varphi_x + \Delta\varphi_z.$$

Прирівнявши δ_Σ нулю, отримаємо, що $\sqrt{2}\Delta k + \Delta\varphi_x = -\Delta\varphi_z$.

З останнього співвідношення можна зробити висновок, що для кута падіння $\varepsilon = 45^\circ$ можлива взаємна компенсація розглянутих похибок. Для цього в конструкції вузла необхідно передбачити можливість його малих поворотів відносно вісі Z в ту або іншу сторону. Максимальна можлива недокомпенсація буде при куті падіння $\varepsilon = 65^\circ$.

6.7. Сканувальні вузли з призмами і багатограними дзеркалами

Такі пристрої застосовуються в системах для картографування місцевості, а також для дистанційного зондування поверхні Землі [11]. Встановлюють такі пристрої на літаках, гвинтокрилах, супутниках. Схема використання пристрою представлена на рис. 6.20.

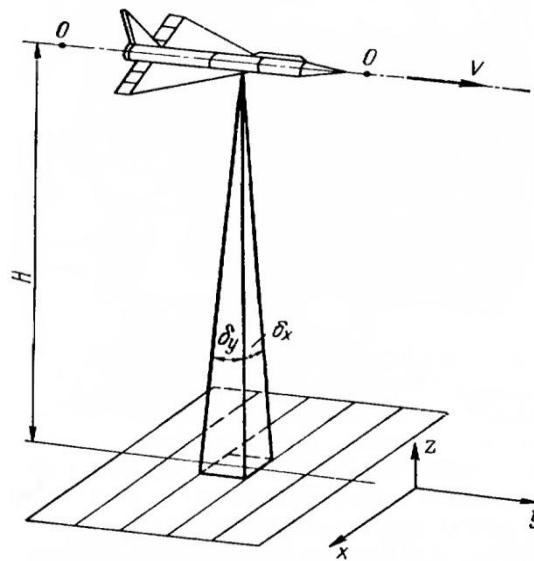


Рис. 6.20. Схема використання пристрою для картографування місцевості

Одним з основних елементів такої системи є багатогранне дзеркало на основі призми або піраміди. Схеми використання призм і пірамід приведені на рис. 6.21. Якщо перед об'єктивом встановлена призма, що обертається, то

кут сканування або кутовий розмір рядка може бути знайдений із співвідношення:

$$\varphi = \rho \gamma, \quad (6.74)$$

де ρ – коефіцієнт, що залежить від типу багатогранного дзеркала;

γ – кут повороту багатогранного дзеркала.

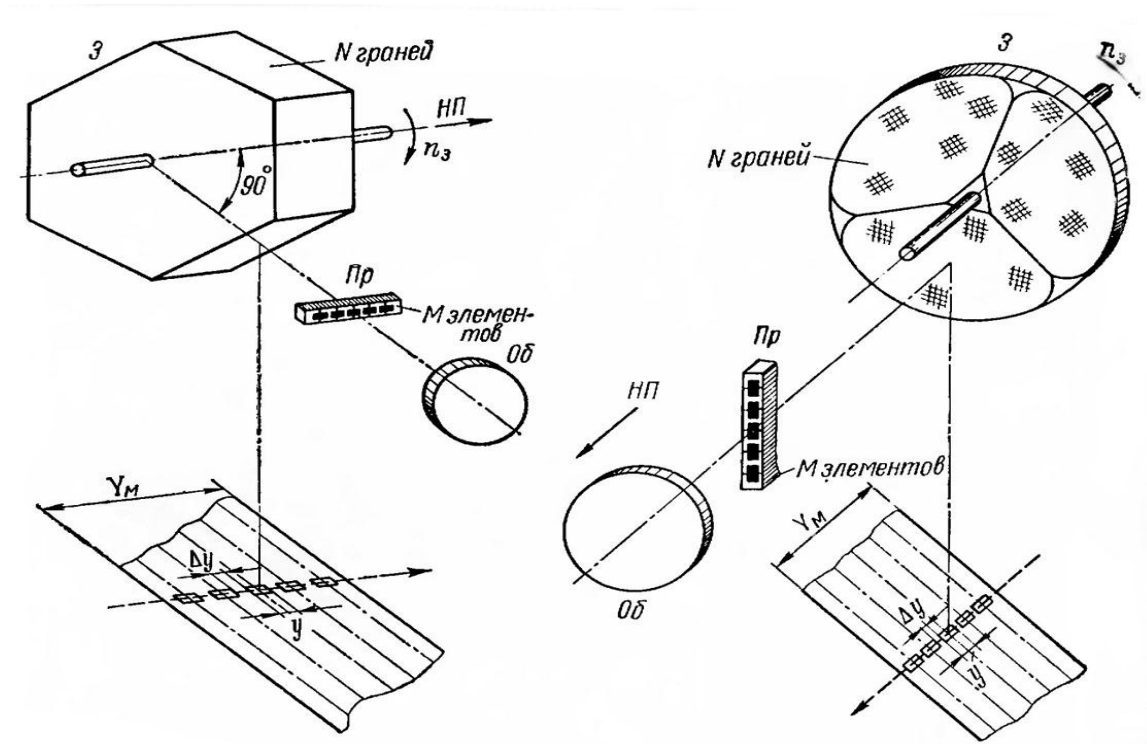


Рис. 6.21. Сканувальні пристрої

У разі призми $\rho = 2$, в разі піраміди $\rho = 1$. Кутовий розмір рядка не може бути реалізований по його максимальному значенню, оскільки для цього розміри кожної грані дзеркала, що відбиває, мають бути нескінченно великими. Співвідношення (6.74) визначає максимально можливий розмір рядка. В результаті повороту настає віньєтування пучка, тому кутовий розмір рядка складає долю від φ і вона визначається коефіцієнтом використання:

$$\varphi_c = \eta \varphi_{\max}, \quad (6.75)$$

де η – коефіцієнт використання грані дзеркала.

Можливе значення кута γ визначається наступним співвідношенням:

$$\gamma = \frac{2\pi}{N}, \quad (6.76)$$

де N – кількість граней багатогранного дзеркала.

Тоді для кутового розміру рядка справедливе співвідношення:

$$\varphi_c = \eta \frac{360^\circ}{N/\rho}, \quad (6.77)$$

де $\eta = 0,2 \div 0,75$.

Якщо прийняти кутовий розмір рядка 90° то для того, щоб реалізувати $\eta = 0,75$, необхідно мати $N/\rho = 3$ тобто має бути використана шестигранна призма або тригранна піраміда. Основні співвідношення, що визначають параметри сканувальної апаратури, можуть бути отримані виходячи з умови відсутності пропусків при скануванні. Один елемент приймача променистої енергії, що має кутовий розмір уздовж напрямку польоту δ_y , утворює при скануванні на поверхні Землі смугу шириною

$$y = \delta_y H, \quad (6.78)$$

де H – відстань до поверхні Землі.

При використанні багатоелементного приймача ширина смуги, що проглядається, або розмір кадру буде дорівнювати:

$$y_n = \delta_{y+\Delta y} HM, \quad (6.79)$$

де Δy – індекс, який характеризує відстань між приймачами;

M – кількість пікселів фотоприймача.

Час, в перебігу якого ця смуга сканується однією гранню дзеркала (період рядка), дорівнює:

$$T_c = \frac{\varphi_{\max}}{\omega_n}, \quad (6.80)$$

де ω_n – кутова швидкість обертання променя.

ω_n пов'язана з кутовою швидкістю обертання призми співвідношенням:

$$\omega_n = \rho \omega_{np} = \rho \frac{2\pi}{60} n_{np}. \quad (6.81)$$

Остаточно для періода рядка отримаємо:

$$T_c = \frac{\varphi_c \cdot 60}{2\pi\eta\rho m_{np}}. \quad (6.82)$$

Співвідношення (6.82) можна переписати таким чином:

$$T_c = \frac{60}{n_{np}} \cdot \frac{\varphi_c}{2\pi} \cdot \frac{1}{\rho\eta}. \quad (6.83)$$

Якщо в це співвідношення підставити величину φ_c , то отримаємо

$$T_c = \frac{60}{n_{np}} \cdot \eta \cdot \frac{360}{\left(\frac{N}{\rho}\right)2\pi} \cdot \frac{1}{\eta\rho}. \quad (6.84)$$

Після перетворень отримаємо:

$$T_c = \frac{60}{n_{np}} \cdot \frac{1}{N}. \quad (6.85)$$

Відстань, що пролітає літак зі швидкістю V за час T_c , визначається співвідношенням:

$$Y = V \cdot T_c = \frac{60}{n_{np}} \cdot \frac{V}{N}. \quad (6.86)$$

Умова відсутності пропусків при скануванні наступна:

$$\Delta = Y - Y_m = \frac{60}{n_{np}} \cdot \frac{V}{N} - \delta_{y+\Delta y} \cdot HM = 0. \quad (6.87)$$

Виходячи з рівняння (6.87), можна визначити n_{np} , при якому відсутні пропуски

$$n_{np} = \frac{60 \cdot V}{\delta_{y+\Delta y} \cdot HMN}. \quad (6.88)$$

Час, в перебігу якого точковий об'єкт сканується одним елементом приймача, визначається із співвідношення:

$$\tau = \frac{\delta_x}{\omega_l} = \left(\frac{\delta_x}{2\pi\varphi} \right) \cdot \left(\frac{60}{n_{np}} \right). \quad (6.89)$$

Із співвідношення (6.89) можна визначити значення n_{np} , що дорівнює:

$$n_{np} = \left[\frac{\delta_x}{2\pi\varphi} \right] \cdot \frac{60}{\tau}. \quad (6.90)$$

Порівнюючи між собою співвідношення (6.88) і (6.90) отримаємо співвідношення для визначення середнього геометричного поля зору оптичної системи

$$\delta = \sqrt{\delta_x \delta_{y+\Delta y}} = \sqrt{\frac{2\pi}{\left(\frac{N}{\rho}\right)} \cdot \frac{\tau}{M} \frac{v}{H}}. \quad (6.91)$$

Контрольні питання

1. Призначення ДПС.
2. Класифікація ДПС.
3. Матриця дії плоского дзеркала
4. Як оптимізувати конструкцію вузла плоского дзеркала?
5. Залежність між товщиною і лінійними розмірами плоского дзеркала.
6. Діючі пересування плоского дзеркала.
7. Матриця дії КД
8. Особливі напрями в конструкції КД.
9. Діючі пересування КД.
10. Оптимізація конструкції вузла КД.
11. В чому полягає графоаналітичний метод визначення габаритів призм?
12. Зведення складних ДПС до простих еквівалентів.
13. Основні похибки скандувальної системи з плоским дзеркалом.
14. Призначення і принцип дії скандувальних систем з багатогранними дзеркалами.
15. Послідовність розрахунку сканувальної системи.

РОЗДІЛ 7

КОНСТРУЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВУЗЛІВ ТОЧНОГО ВІДЛІКУ

7.1. Характеристики оптико-механічних вузлів точного відліку

Відлікові пристрої застосовують у всіх оптичних вимірювальних приладах: гоніометрах, геодезичних приладах, далекомірах, вимірювальних лінійках та ін. Важливою частиною відлікових пристроїв є різні мікрометри, які слугують для визначення з необхідною точністю долі ділення основної вимірювальної шкали. Залежно від чутливого елементу відлікові пристрої розділяють на візуальні і фотоелектричні, які характеризуються такими параметрами:

- ціна ділення шкали: кутова або лінійна;
- видимий розмір ділення шкали;
- роздільна межа системи відліку;
- похибка виміру.

При розрахуванні візуальних відлікових пристроїв необхідно враховувати роздільну здатність ока і його зв'язок з роздільною межею відлікової системи. Роздільна здатність ока залежить від способу відліку і має параметри наведені в табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Роздільна здатність ока

Спосіб відліку	Кутове розділення, кутові секунди	Лінійне розділення, мм
Оцінка десятих долей шкали на око	$80 \div 100$	$0.1 \div 0.15$
Збіг двох одинарних штрихів (ноніус)	$8 \div 20$	$0.01 \div 0.02$
Збіг біфілярних (подвійних) штрихів	$6 \div 12$	$0.01 \div 0.015$

Точність відліку залежить від конструктивних параметрів відлікової системи. Наприклад, якщо розробляється кутомірний відліковий пристрій без використання збільшення, то схема побудови такого пристрою може виглядати так, як показано на рис.7.1. При цьому лінійна роздільна здатність ока дорівнюватиме:

$$\delta_{ока} = 250 \cdot \rho_{ока} \quad (7.1)$$

де $\rho_{ока}$ – кутова роздільна здатність ока.

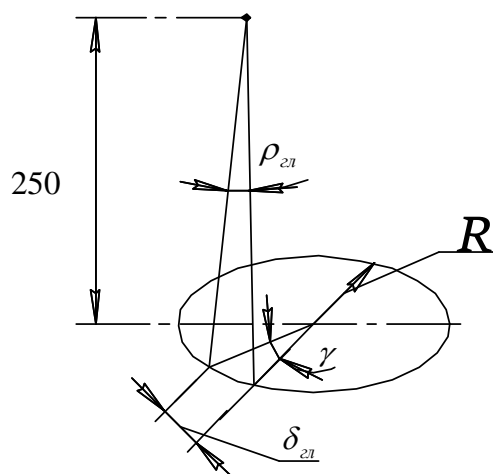


Рис. 7.1. Схема побудови кутомірного відліку

Кут, що розділяє кутовимірвальна система в радіанній і кутовій мірах визначатиметься співвідношеннями:

$$\gamma = \frac{\delta_{ока}}{R} (рад); \quad (7.2)$$

$$\gamma'' = \frac{250}{R} \cdot \rho_{ока}. \quad (7.3)$$

З (7.3) видно, що чим більше радіус лімба, тим точніше вимір. Але необмежено збільшувати радіус лімба не можна з конструктивних міркувань. В реальних приладах радіус може дорівнювати 150–250мм.

Візуальні вимірвальні пристрої можуть будуватися на принципах:

- оцінка десятих долей ділення шкали по індексу (нуль-штриху);
- оцінка збігом двох штрихів;

- оцінка установкою штриха в бисекторі;
- принцип поєднання (спосіб коінцеденс).

Простим варіантом побудови є перший метод. Для його реалізації видимий інтервал між діленнями шкали повинен складати 1,0-1,5 мм з врахуванням збільшення. Для збільшення основної шкали можуть застосовуватися два типи відлікових мікроскопів: штриховий мікроскоп і шкаловий мікроскоп.

Часто у відлікових мікроскопах застосовується додаткова верн'єрна шкала. Інтервалу в n ділень верн'єрної шкали відповідає $n-1$ ділення основної шкали. Тобто справедливі співвідношення:

$$n\gamma_e = (n-1)\gamma_u; \quad (7.4)$$

$$n\gamma_e = n\gamma_u - \gamma_u; \quad (7.5)$$

$$\gamma_e = \frac{n\gamma_u - \gamma_u}{n}. \quad (7.6)$$

Останнє співвідношення визначає точність верн'єра. При використанні методу бисектирування необхідно дотримуватися співвідношення між відстанню між штрихами бисектора і товщиною штриха. Ця відстань повинна дорівнювати $\Delta = 2,3 \cdot t_{um}$, де t_{um} – товщина штриха. У високоточних вимірювальних приладах для виключення впливу ексцентриситету на точність виміру застосовується метод коінцеденс

У вимірювальних пристроях застосовуються два типи відлікових мікроскопів: штриховий і шкаловий. В штриховому мікроскопі на сітці наноситься одиночний штрих. В шкаловому між зображеннями сусідніх ділень основного лімба наноситься допоміжна відлікова шкала (Рис. 7.2).

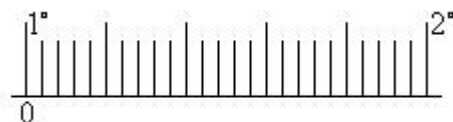


Рис. 7.2. Допоміжна відлікова шкала

Нуль відліку допоміжної відлікової шкали водночас є нуль пунктом. При розробці шкалових мікроскопів необхідно точно встановлювати їхнє

збільшення з тим, щоб відстань між зображеннями поділок основної шкали строго відповідала лінійному розміру допоміжній шкалі. Відстань між зображенням штрихів допоміжної шкали з урахуванням збільшення окуляра повинна знаходитися в діапазоні 1,0–1,5 мм, тоді інтервал між поділками допоміжної шкали повинен дорівнювати $\delta = \frac{1,0 \div 1,5}{\Gamma_{ок}}$. Товщина штрихів допоміжної шкали визначатиметься із співвідношення $t_{шт} = \frac{0,1 \div 0,15}{\Gamma_{ок}}$.

У двох типах відлікових мікроскопів частка ділення допоміжної відлікової шкали оцінюється на око і для підвищення точності відліку необхідно використовувати відлікові мікроскопи великого збільшення. Тому для підвищення точності зняття відліків використовуються різні види мікрометрів:

- гвинтові механічні;
- оптичні.

До першого типу належать механічні гвинтові окулярні мікрометри (МОВ –1, 2) з сіткою, що рухається з використанням методу бісектирування. Гвинтовий мікрометр дозволяє оцінити відстань від його нуль-пункта до зображення штриха шкали лімба кількістю обертів мікрометренного гвинта, який поступально пересуває рамку з сіткою. Мікрометренні гвинти виготовляють з максимально можливою точністю. Ходова похибка гвинта складає 0,5 – 1,5 мкм на 6 – 8 обертів гвинта. В відлікових мікроскопах ця похибка усувається юстуванням збільшення мікрооб'єктива. Періодична похибка гвинта, що з'являється при кожному оберті і змінюється по гармонічному закону складає 0,3 – 0,8 мкм.

7.2. Оптико-механічні мікрометри

Оптико-механічний мікрометр це вимірювальний пристрій з оптичними елементами, зміна положення яких приводить до відповідної зміни положення зображення штрихів лімба (лінійної шкали) відносно нуль-пункту мікрометра. Як елементи мікрометра застосовуються:

- плоскопаралельна пластинка(ППП), що обертається;

- клини, що обертаються;
- клини, що лінійно пересуваються;
- лінзи, що пересуваються або нахиляються.

Схема мікрометра з ППП, що обертається представлена на рис. 7.3.

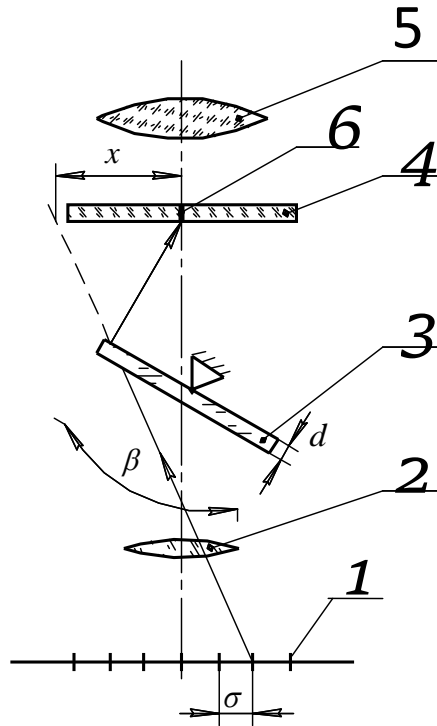


Рис. 7.3. Оптична схема мікрометра з плоскопаралельною пластинкою:

1 – основна шкала ; 2 – мікрооб’єктив відлікового пристрою; 3 – поворотна ППП;
4 – допоміжна шкала ; 5 – окуляр; 6 – нуль пункт

Основна шкала 1 проектується мікрооб’єктивом 2 в площину допоміжної шкали 4. Зрушення площини зображення при повороті ППП пов’язане з її поворотом співвідношенням:

$$x = d \cdot \sin \beta \left(1 - \frac{\cos \beta}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \beta}} \right), \quad (7.7)$$

де n – показник заломлення ППП;

β – кут повороту ППП;

d – товщина ППП.

Як правило, кут повороту ППП малий. Для малих β співвідношення (7.7) змінюється так:

$$x = d \left(\frac{n-1}{n} \right) \operatorname{tg} \beta \quad (7.8)$$

Якщо в співвідношенні (7.8) $\operatorname{tg} \beta$ розкласти в ряд Маклорена і обмежитися першими двома членами розкладання, прийнявши $n = 1,5163$, отримаємо наступне співвідношення:

$$x = 0.002 d (3\beta + 3 \cdot 10^{-4} \beta^3). \quad (7.9)$$

Співвідношення (7.9) містить лінійну і нелінійну частини, відповідно:

$$x_{\text{лін}} = 6 \cdot 10^{-3} d \cdot \beta - \text{лінійна частина}; \quad (7.10)$$

$$x_{\text{нелін}} = 6 \cdot 10^{-7} d \cdot \beta^3 - \text{нелінійна частина}. \quad (7.11)$$

Для того, щоб при малих кутах повороту розширити діапазон виміру, ставлять ще одну ППП, яка зрушує зображення в протилежну сторону. Відносна похибка виміру, обумовлена нелінійністю, може бути визначена із співвідношення:

$$\frac{x_{\text{нелін}}}{x_{\text{лін}}} = \frac{6 \cdot 10^{-7} d \cdot \beta^3}{6 \cdot 10^{-3} d \cdot \beta} = 10^{-4} \beta^2. \quad (7.12)$$

Якщо задана похибка, обумовлена нелінійністю, то із співвідношення (7.12) може бути визначений максимальний кут повороту ППП:

$$\beta^{\circ} \max = 100 \sqrt{\frac{x_{\text{нелін}}}{x_{\text{лін}}}}. \quad (7.13)$$

На підставі співвідношень (7.8) і (7.12) можна визначити товщину ППП:

$$d = \frac{x \cdot n}{(n-1) \cdot \operatorname{tg} \beta_{\max}}. \quad (7.14)$$

Для розвороту плоскопаралельної пластинки може бути використаний механізм на основі спіралі Архімеда (див. рис. 7.4). При повороті диска на один оберт, кінці важелів пересуваються з положень $a_1 b_1$ в $a_2 b_2$. Рівняння спіралі Архімеда в полярних координатах має вигляд:

$$\rho = \frac{a\varphi}{2\pi}, \quad (7.15)$$

де φ – кут повороту.

При вибраному кроці і відомому куті повороту відстань S визначається із співвідношення:

$$S = \frac{a}{2\beta_{\max}} \rho', \quad (7.16)$$

де ρ' – перевідний коефіцієнт з кутової міри в радіанну.

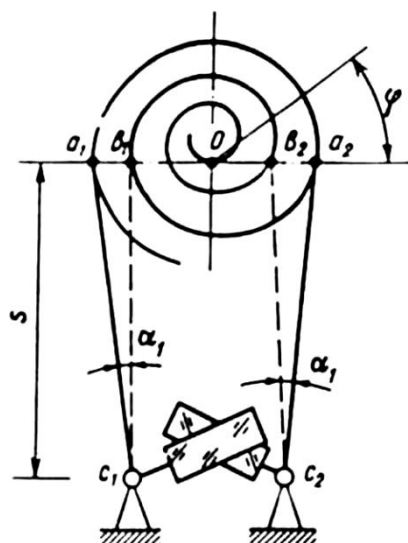


Рис. 7.4. Схема механізму на основі спіралі Архімеда

Компенсатор з оптичними клинами може бути розташований як в паралельному пучку, так і такому, що сходиться. Схема компенсатора, розташованого в паралельному пучку, представлена на рис. 7.5.

За наявності одного клина зображення, що створюється об'єктивом 2, пересуватиметься по колу радіусом:

$$r_{1,2} = \frac{\sigma(n-1)f'_{об}}{\rho''}, \quad (7.17)$$

де σ – заломлюючий кут клина;

n – показник заломлення клина;

f – фокусна відстань об'єктива 2;

ρ – перевідний коефіцієнт з секунд у радіани.

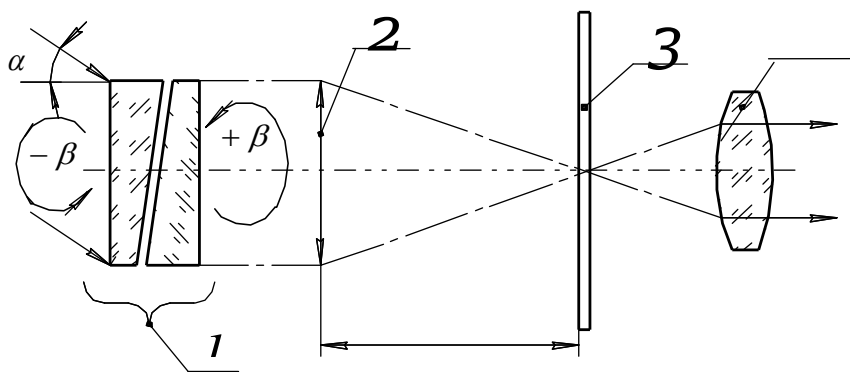


Рис. 7.5. Компенсатор з оптичними клинами в паралельному пучку:

1 – клини компенсатора; 2 – об'єктив; 3 – допоміжна шкала; 4 – окуляр

Якщо обертаються два клини водночас, то пересування зображення буде направлено уздовж вектора, який може бути отриманий підсумовуванням векторів r_1 і r_2 як це показано на рис. 7.6.

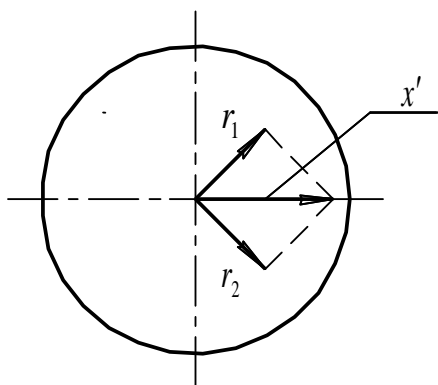


Рис. 7.6. Пересування зображення клинами

Для пересування зображення по двом координатам необхідно застосувати дві пари клинів. Кут, що компенсується, пов'язаний з кутом повороту клинів робочою формулою:

$$\alpha = 2\sigma(n-1)\sin\beta. \quad (7.18)$$

Бачимо, що характеристика такого мікрометра нелінійна і пропорційна $\sin\beta$. Тому кут повороту клинів обмежують величиною декілька градусів. Для розширення діапазона роботи таких мікрометрів компенсатор зазвичай забезпечують сінусним механізмом (рис. 7.7), який компенсує цю нелінійність.

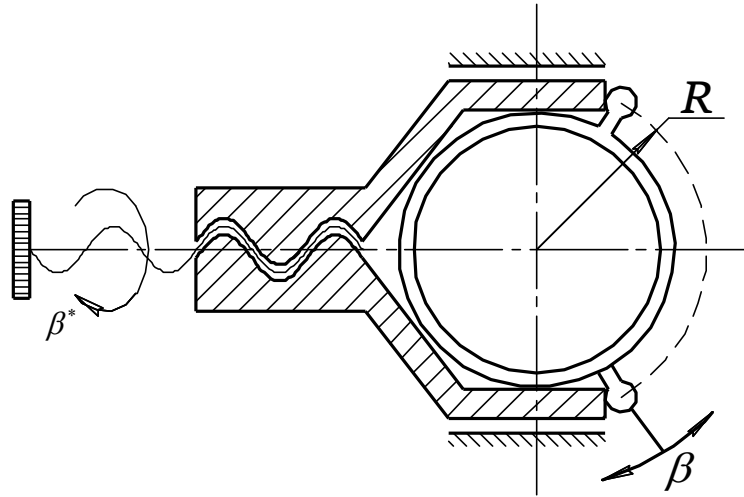


Рис. 7.7. Сінусний механізм

Для синусного механізму

$$\sin \beta = \frac{S\beta^*}{R \cdot 360^\circ}, \quad (7.19)$$

де S – крок мікрометричного гвинта;

R – радіус, на якому розташовані штовхачі.

Тоді кут, що компенсується дорівнює:

$$\alpha = \frac{2\sigma(n-1)S\beta^*}{360^\circ R}. \quad (7.20)$$

Схема клинового компенсатора з клинами, розташованими в пучку променів, що сходиться, представлена на рис. 7.8. Величина кута δ визначається рівнянням:

$$\delta = \sigma(n-1) \left(1 + \frac{n+1}{2n} \varepsilon^2 \right) \quad (7.21)$$

Якщо передня грань клина перпендикулярна оптичній вісі, то $\varepsilon = \alpha$.

При розрахунку компенсаторів підбирають відповідні значення параметрів, прагнучи до того, аби заломлюючий кут був допустимим. Якщо хроматизм, що вноситься клином, більше допустимого, то встановлюють другий клин що забезпечує ахроматизацію.

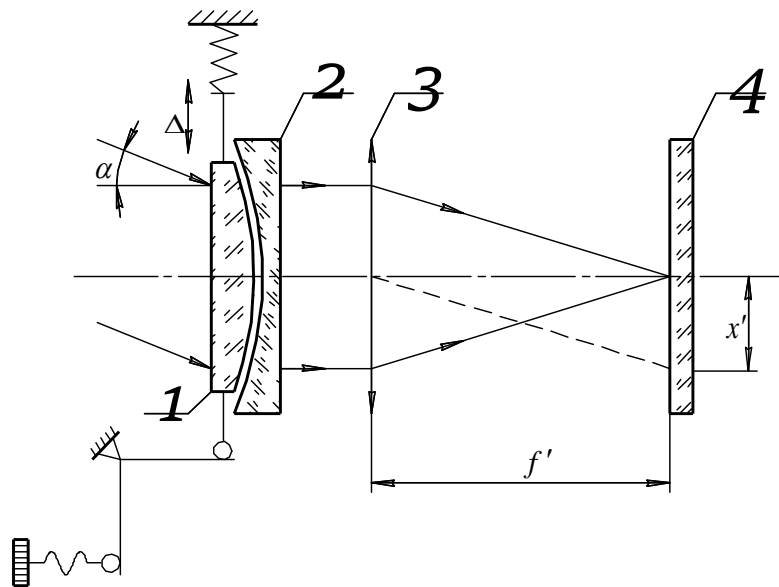


Рис. 7.9. Афокальний лінзовий компенсатор:

1, 2 – лінзи компенсатора; 3 – мікрооб’єктив відлікового пристрою; 4 – допоміжна шкала

Схема компенсатора з телескопічною лінзою, що розташована в пучку променів, що сходиться, представлена на рис. 7.10.

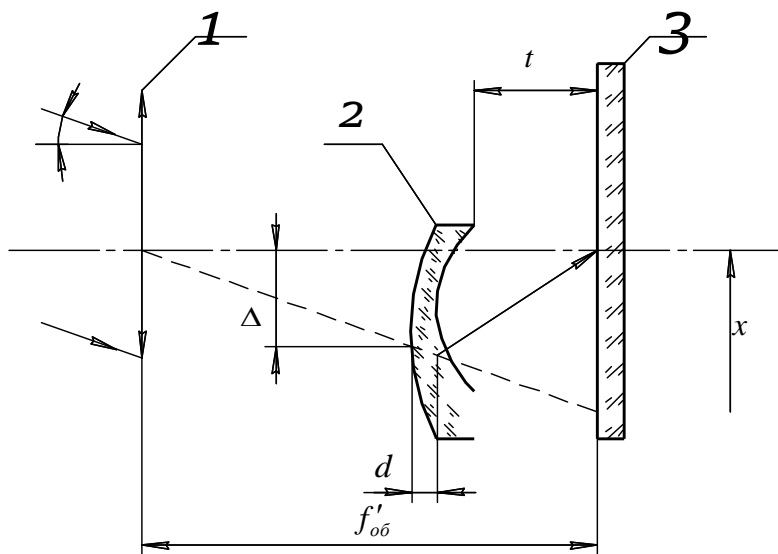


Рис. 7.10. Компенсатор з телескопічною лінзою:

1 – мікрооб’єктив; 2 – телескопічна лінза; 3 – допоміжна шкала

Зсув зображення у фокальній площині об’єктива дорівнює:

$$x = \Delta \frac{\partial \Gamma}{\Gamma} + \frac{\Delta^2 (n-1)}{2r_1^2 n^3} \left(\frac{d}{n} - t \partial \Gamma \right), \quad (7.25)$$

де Δ – пересування телескопічної лінзи;

Γ – кутове збільшення системи;

r_1 – радіус першої поверхні телескопічної лінзи;

n – показник заломлення телескопічної лінзи;

t – відстань від лінзи до площини шкали;

d – товщина телескопічної лінзи.

Радіус першої поверхні телескопічної лінзи дорівнює:

$$r_1 = \frac{\Gamma(n-1)}{\delta\Gamma \cdot n} d. \quad (7.26)$$

7.3. Фотоелектричні відлікові пристрої. Кодові та растрові відлікові пристрої

Основним вузлом фотоелектричних відлікових пристроїв є фотоелектричний мікроскоп. Схема мікроскопа представлена на рис. 7.11.

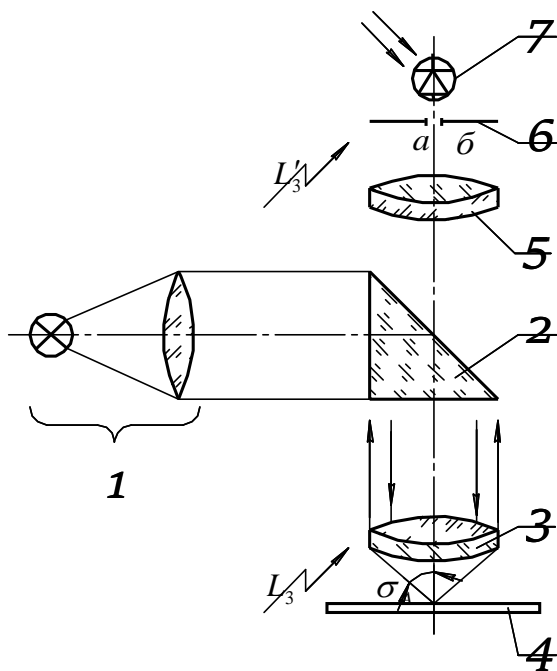


Рис. 7.11. Схема фотоелектричного мікроскопа:

1 – освітлювач; 2 – призма АР-90; 3 – мікрооб'єктив; 4 – основна шкала; 5 – допоміжний об'єктив; 6 – аналізуюча діафрагма; 7 – фотоприймач

Вимір положення основної шкали відбувається підрахунком числа зображень штрихів, що пройшли повз аналізуючу діафрагму під час переміщення основної шкали перпендикулярно до оптичної вісі мікроскопа. Похибка виміру за допомогою фотоелектричного мікроскопа дорівнює [12]:

$$\Delta x = \frac{x_0}{\beta} + \frac{2xL_3}{L_\phi - L_u} + \frac{2L'\beta^2 x}{\tau \sin^2 \sigma_A (L_\phi - L_u)}, \quad (7.27)$$

де x_0 – початкове зрушення діафрагми відносно базового нульового положення;

L_ϕ – яскравість фону;

L_u – яскравість штриха;

L'_3 – яскравість стороннього засвічення безпосередньо через аналізуючу щілину мікроскопа;

x – діапазон зсувів, що вимірюються;

σ_A – апертурний кут об'єктива;

τ – коефіцієнт пропускання оптичної системи;

β – збільшення мікроскопа.

Збільшення мікроскопа впливає на похибку вимірів. Оптимальне збільшення фотоелектричного мікроскопа визначають з похідної від Δx по β

$$\beta_{opt} = \sqrt{\frac{x_0 \tau \sin^2 \sigma'_A (L_\phi - L_u)}{4xL'_3}}. \quad (7.28)$$

У фотоелектричних мікроскопах з модуляцією світлового потоку (рис. 7.12) інформація про зсув штриха перетворюється сканувальним пристроєм і оптичною системою згідно з законом зміни освітленості фотоприймача в часі.

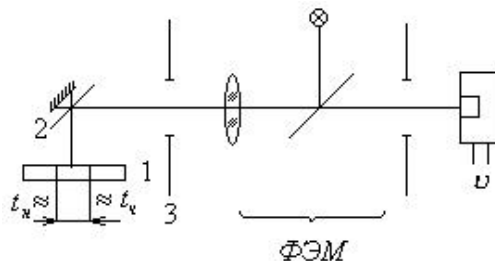


Рис. 7.12. Фотоелектричний мікроскоп з модуляцією світлового потоку:

1 – основний лімб; 2 – сканатор; 3 – діафрагма

Окрім фотоелектричних мікроскопів у сучасних вимірювальних приладах широко застосовуються кодові і растрові відлікові пристрої. Основним елементом в таких відлікових пристроях є кодові диски або растри. Характеристиками таких пристроїв є:

- форма представлення вхідних і вихідних величин;
- діапазон зміни вхідних величин;
- роздільна здатність, яку можна визначити по формулі:

$$\Delta x_p = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{N}, \quad (7.29)$$

де x_{\max}, x_{\min} – максимальне і мінімальне значення величини, що вимірюється, відповідно;

N – число дискретних рівнів квантування.

Існують два основні способи отримання числового еквіваленту вимірюваної безперервної величини [12]:

- метод послідовного рахунку, при якому застосовуються растри і растрові поєднання;
- метод прочитування, при якому застосовуються різні кодові шкали.

Відомі різні види кодових шкал. Основна проблема при їх використанні полягає в можливій невизначеності положення шкали, коли фотоприймач розташований на межі світлої і темної смуг растру. У зв'язку з цим використовуються спеціальні типи кодових растрів або спеціальне розташування приймачів випромінювання. У перетворювачах послідовного рахунку ведеться послідовний рахунок числа одиниць молодшого розряду, як складових значення вимірюваної величини. У перетворювачах прочитування вимірювана величина порівнюється із заздалегідь заготовленим числовим еквівалентом. Робочими елементами в цих пристроях є кодові шкали: кругові або лінійні. Принцип дії цих пристроїв пояснює рис. 7.13. Кожному положенню диска відповідає комбінація прозорих і непрозорих ділянок. Така конструкція відповідає двійковому коду: прозора – «1», непрозора, – «0». За диском розташовується діафрагма (3) і лінійка фотоприймачів (4). Сигнал з фотоприймача обробляється мікропроцесором (5). При двійковому кодуванні

весь діапазон вимірюваної величини розбиваються на інтервали кратні роздільній здатності пристрою Δx_p . Молодший розряд вимірюваної величини знаходиться на зовнішньому кільці, а старший – на внутрішньому. Для здобуття n розрядного числа, необхідно мати n кодових доріжок.

Якщо кодовій доріжці привласнити кодовий номер, починаючи з внутрішньої, то число темних і світлих ділянок на кожній доріжці визначається по формулі:

$$N_T = N_c = 2^{k-1}, \quad (7.30)$$

де k – номер доріжки.

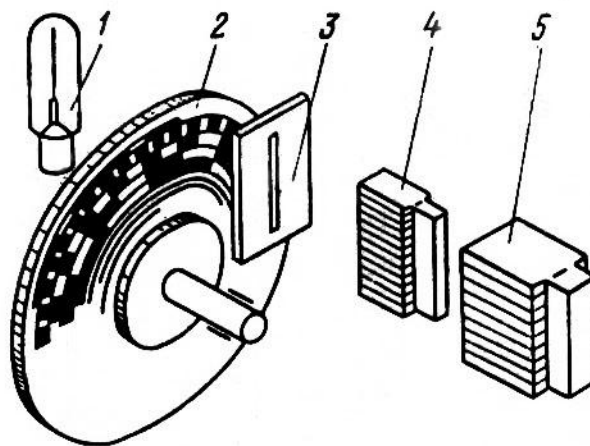


Рис. 7.13. Принципова схема перетворювача прочитування:

1 – джерело світла; 2 – кодовий диск; 3 – діафрагма; 4 – лінійка фотоприймачів;
5 – мікропроцесор

Необхідну комбінацію реалізацій визначимо за формулою:

$$N_k = 2^n, \quad (7.31)$$

де n – число розрядів.

Число розрядів для кругової шкали визначається необхідним кутовим розділенням:

$$\Delta x_p = \frac{360^\circ}{N_k} = \frac{360^\circ}{2^n}, \quad (7.32)$$

тоді

$$n = \log_2 \frac{360^\circ}{\Delta x_p}. \quad (7.33)$$

Як приклад дамо деякі співвідношення між числом розрядів і роздільною здатністю відлікового пристрою, що зведені в табл. 8.2.

Таблиця 8.2

Співвідношення між числом розрядів і роздільною здатністю

n	7	16	20	24
Δx_p	2° 48' 45''	20''	1,25''	0,08''

Значення числа розрядів на практиці має такі обмеження:

- частота дотримання ліній в молодшому розряді не може бути менше 3 мкм, оскільки технологічні можливості виготовлення шкал обмежені товщиною штриха в 1,5 мкм;
- максимальний діаметр кодової доріжки з конструктивних міркувань обмежується величиною 350 – 400 мм (для унікальних установок); в реальних умовах цей діаметр значно менше і складає 120 – 150 мм.

З врахуванням сказаного максимальне значення числа розрядів кодового диска може бути визначене з співвідношення:

$$n_{\max} = \log_2 \frac{\pi D \cdot 10^3}{1,5}. \quad (7.34)$$

Якщо прийняти $D = 400$ мм, то $n_{\max} = 19$.

У більшості установок використовуються 16-розрядні кодові диски. Фотоприймачі в цих пристроях розташовуються по радіусу. Внаслідок кінцевих розмірів світлової плями прочитування виникає невизначеність прочитування. Для виключення невизначеності і появи помилкових кодів обмежують розмір світлової плями прочитування і спеціальним чином розташовують фотоприймачі, використовуючи V – подібне розташування, або спосіб «подвійної щітки».

Основні етапи розрахунку перетворювача кут – код такі:

- по заданій роздільній здатності перетворювача визначають число розрядів;
- в результаті енергетичного розрахунку визначають ширину світлової плями прочитування;
- знаючи розмір фотоприймача, визначають діаметр кодового диска;
- визначають спосіб установки фотоприймача або пропонують використання однозмінних кодових дисків.

Кодові відлікові пристрої мають обмеження по роздільній здатності, які реально складають 20'. Більшою точністю характеризуються растрові (муарові) відлікові пристрої. Ці пристрої використовують метод послідовного відліку растрових елементів. Основними характеристиками растрів є період дотримання прозорих і непрозорих ділянок і пропускання. Відлікові пристрої з використанням растрових елементів спрощено будуються за схемою показаною на рис. 7.14.

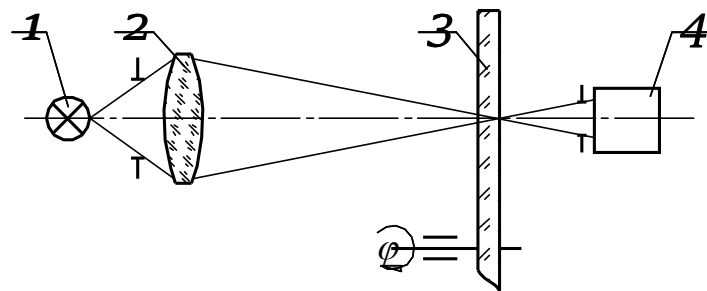


Рис. 7.14. Відлікові пристрої з використанням растрових елементів:

1 – джерело; 2 – конденсор; 3 – вимірювальний растр; 4 – фотоприймач

Робота датчика заснована на визначенні числа імпульсів фотоструму, що отримуються при модуляції світлового потоку джерела (1), потік якого формується конденсором (2) і вимірювальним растром (3). Детектором сигналу є фотоприймач (4). На практиці застосовуються системи, в яких світловий потік проходить відразу через декілька вічок вимірювального растра. При цьому застосовується діафрагма, закріплена нерухомо, яку називають індикаторним растром. Схема такої системи показана на рис. 7.15.

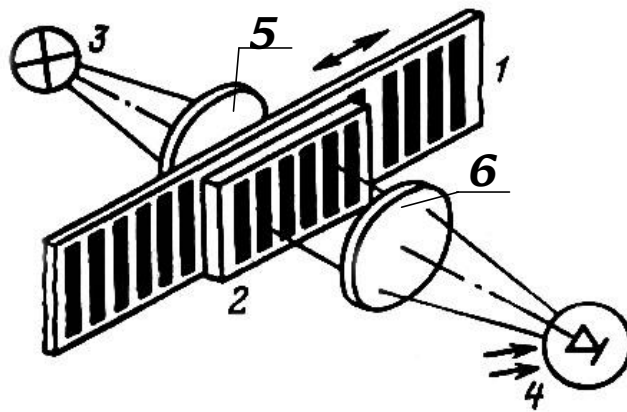


Рис. 7.15. Растрова система з індикаторним растром:

1 – вимірювальний растр; 2 – індикаторний растр; 3 – джерело випромінювання;
4 – фотоприймач; 5 – колімуючий об’єктив; 6 – фокусуєчий об’єктив

Важливою експлуатаційною характеристикою таких пристроїв є можливість реверсу або визначення напрямку пересування вимірювального растра. Для того, щоб реалізувати таку можливість індикаторний растр ділять на дві частини, зрушені одна відносно другої в напрямку пересування вимірювального растра. При русі вимірювального растра в одному напрямку він спочатку перетинає верхню частину індикаторного растра, як це показано на рис. 7.16, а потім нижню частину. При русі в протилежному напрямку спочатку перетинається нижня частина індикаторного растра.

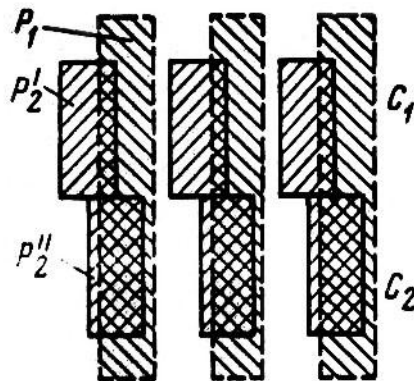


Рис. 7.16. Індикаторний растр розділений на дві частини

Фази сигналів сформованих верхньою або нижньою частинами індикаторного растра характеризує напрям пересування вимірювального растра.

Контрольні питання

1. Основні характеристики відлікових пристроїв.
2. Від чого залежить і яка роздільна здатність ока?
3. Принцип побудови візуальних відлікових пристроїв.
4. Типи оптико-механічних мікрометрів.
5. Принцип дії і характеристики мікрометра з ППП.
6. Принцип дії і характеристики мікрометра з клинами.
7. Принцип дії і характеристики афокального лінзового мікрометра.
8. ФЕМ і його основні характеристики.
9. Принцип дії і характеристики кодових відлікових пристроїв.
10. Принцип дії і характеристики растрових відлікових пристроїв.
11. Основні етапи розрахунку перетворювача кут-код.

Список літератури

1. Справочник конструктора оптико-механических приборов / В. А. Панов, М. Я. Кругер, В. В. Кулагин и др. – Л. : Машиностроение, 1980. – 742 с.
2. Антонов Е. А. Справочник технолога-оптика/ ЕА Антонов, АВ. Байгожин, М. А. Окатов / – СПб. : Политехника, 2004. – 680 с.
3. Ключникова Л. В. Проектирование оптико-механических приборов / Л. В. Ключникова, В. В. Ключников. – СПб. : Политехника, 1995. – 206 с.
4. Плотников В. С. Расчет и конструирование оптико-механических приборов / В. С. Плотников, Д. И. Варфоломеев, В. Е. Пустовалов. – М. : Машиностроение, 1983. – 256 с.
5. Кулагин В. В. Основы конструирования оптических приборов / В. В. Кулагин. – Л. : Машиностроение, 1982. – 312 с.
6. Справочник конструктора точного приборостроения / В. А. Веркович, Б. П. Тимофеев, К. Н. Явлинский и др. – Л. : Машиностроение, 1989. – 792 с.
7. Латыев С. М. Компенсация погрешностей в оптических приборах / С. М. Латыев. – Л. : Машиностроение, 1985. – 248 с.
8. Латыев С. М. Конструирование точных (оптических) приборов / С. М. Латыев. – СПб. : Политехника, 2007. – 579 с.

9. Парвулюсов Ю. Д., Проектирование оптико-электронных приборов / Ю. Д. Парвулюсов, Ю. Г. Якушенков, Н. И. Солдатов. – М. : Машиностроение, 1992. – 421 с.
10. Погарев Г. В. Юстировка оптических приборов / Г. В. Погарев. – Л. : Машиностроение, 1982. – 237 с.
11. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико- электронных приборов / М. М. Мирошников. – Л. : Машиностроение, 1983. – 696 с.
12. Плотников В. С. Геодезические приборы / В. С. Плотников. – М. : Недра, 1987. – 397 с.